



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
2009

**Francisco Manuel
Pereira da Silva**

**Adaptação das ferramentas moldantes a
sistemas de microinjecção**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
2009

**Francisco Manuel
Pereira da Silva**

Adaptação das ferramentas moldantes a sistemas de microinjecção

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Prof. Doutor Victor Fernandes dos Santos Neto, Investigador do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho aos meus pais e irmão pelo incansável apoio prestado ao longo do meu percurso académico.

o júri

Presidente	Prof. Dr. Robertt Angelo Fontes Valente Professor auxiliar Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro
Arguente	Prof. Dr. Nuno Manuel Fernandes Alves Professor Adjunto Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Orientadora	Prof. Dra. Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia Professor auxiliar Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro
Co-orientador	Prof. Dr. Victor Fernando dos Santos Neto Investigador Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade de Aveiro

agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos aqueles que me incentivaram e apoiaram ao longo do meu percurso académico.

Em especial à Prof. Doutora Mónica Oliveira e ao Doutor. Victor Neto, professores orientadores, pela disponibilidade e ajuda prestada. A Eng. Tatiana Zhiltsova, pelo apoio prestado na simulação numérica.

Ao meus colegas João Estima, Nuno Inácio, Hélder laranjeira, Luís Todo Bom e Diogo Soares pela entreaajuda prestada e pelos momentos de muito boa disposição que ocorreram ao longo deste percurso académico.

Por fim, mas definitivamente não por último... uma palavra de enorme apreço à minha família e aos meus amigos em geral, que tiveram de suportar as minhas indisposições, mas que sempre acreditaram e nunca deixaram de me encorajar.

palavras-chave

Ferramenta moldadente, micro-componentes, microinjecção, termoplásticos, sistema variotérmico.

resumo

Actualmente, a moldação por injecção de termoplásticos é um dos principais processos de conformação de materiais poliméricos, dada a complexidade de peças que é possível moldar e a precisão conseguida na sua produção.

Com o crescente consumo de micro-componentes e sistemas com micro-componentes incorporados, a microinjecção de termoplásticos tem ganho importância no seio tecnológico e industrial.

Com esta tese pretende-se projectar uma ferramenta moldante, um molde de investigação, capaz de produzir micro-componentes em diferentes materiais poliméricos. Para tal ser possível, procedeu-se ao estudo de algumas soluções que se preconizam vir a minimizar os problemas associados ao processamento de peças de microinjecção. Desde o sistema de alimentação, passando pela geometria da ferramenta, até ao sistema de controlo de temperatura, a ferramenta moldante projectada, propõem-se reproduzir micro-componentes de geometrias complexas e com capacidade de injecção de uma vasta gama de materiais poliméricos.

Como auxílio ao projecto, foram utilizadas quer metodologias analíticas, quer ferramentas de simulação numérica, de modo a fundamentar as escolhas inerentes aos diferentes sistemas funcionais em estudo.

keywords

Mold, micro-components, microinjection, thermoplastics, variotherm system.

abstract

At present, injection moulding may be considered one of the most important processes to obtain polymeric parts, since part precision and complexity may be easily achieved.

With a growing interest on micro-components and systems incorporating micro-parts, microinjection moulding starts playing a major role in industry.

With this work it is intended to design a moulding tool to serve research purposes involving microinjection materials and systems tools.

To achieve the latter, a few solutions have been postulated and studied in order to solve the main known problems involving the injection moulding of micro-parts. Each particular functional system was studied and designed in order to enable the allocation of micro-featured inserts (to mold micro-components)

Furthermore, most heating solutions have been envisaged, designed and modeled in order to overcome challenges imposed by part complexity, dimension stability and polymeric flux of materials with high melt indexes, typical of microinjection moulding.

To enable mould design both analytical and numerical tools were used.

Índice de Conteúdos

1. Introdução	1
1.1. Objectivos	1
1.2. Enquadramento	1
1.3. Conteúdos da dissertação.....	2
2. Revisão bibliográfica.....	4
2.1. Introdução	4
2.2. Micro-componentes.....	6
2.3. Moldação de termoplásticos	7
2.3.1. Moldação por injeção	7
2.3.2. Microinjeção	11
2.3.2.1. Processo Variotérmico	14
2.3.2.2. Materiais	17
2.4. Ferramentas.....	21
2.4.1. Máquinas de injeção convencionais	21
2.4.2. Módulo externo de controlo de injeção (unidade redutora).....	22
2.4.3. Máquinas de micro-injeção	25
3. Ante-Projecto	28
3.1. Inserto	28
3.2. Sistema de alimentação	29
3.3. Balanço térmico do molde	30
3.3.1. Dimensionamento das linhas de água	35
3.4. Transferência de calor adicional	37
3.4.1. Balanço térmico do molde variotérmico	38
3.4.2. Cálculo do tempo de aquecimento	41
3.5. Balanceamento	44

3.6.	Material do molde	44
3.7.	Simulação numérica.....	46
4.	Projecto	49
4.1.	Sistema de alimentação	49
4.3.	Balanço térmico.....	50
4.3.1.	Pressupostos	50
4.3.2.	Propriedades do material.....	51
4.3.3.	Cálculo.....	51
4.3.4.	Cálculos sistema Variotérmico	57
4.3.4.1.	Escolha do Sistema de aquecimento:	57
4.4.	Cálculo do tempo de aquecimento do molde	61
4.5.	Sistema de controlo de temperatura.....	62
4.5.1.	Esquema do Sistema de controlo de temperatura	63
4.6.	Balanceamento.....	65
4.7.	Estrutura do molde.....	66
4.8.	Sistema de extracção.....	70
4.9.	Caderno de encargos.....	71
5.	Conclusões e trabalhos futuros.....	72
6.	Referencias	72
7.	Anexos	77

Índice de figuras

Figura 1:Tendência do mercado para as micro-tecnologias	4
Figura 2:micro-inserto e micro-estrutura.....	5
Figura 3:Razão de aspecto	7
Figura 4:Processo de injeção de termoplásticos].....	8
Figura 5:Processo de injeção convencional, gráfico temperatura vs tempo.	10
Figura 6:Processo de microinjeção de termoplásticos.....	12
Figura 7: Efeito da temperatura do molde sobre a razão de aspecto possível de obter.....	12
Figura 8: Efeito da pressão de injeção sobre a razão de aspecto possível de obter.....	12
Figura 9: Problema associado a microinjeção.....	15
Figura 10: Processo variotérmico, gráfico temperatura vs tempo.....	15
Figura 11: Máquina de injeção de termoplásticos convencional.....	22
Figura 12: Esquema em corte de uma máquina convencional com o módulo externo de controlo de injeção.....	23
Figura 13: Esquema em corte de uma máquina convencional com o módulo externo de controlo de injeção,.....	24
Figura 14: Esquema do processo de injeção no módulo de controlo	24
Figura 15: Battenfeld Microsystem 50]	26
Figura 16: Babyplast 6/10P.....	26
Figura 17:Boy 12 A/M	27
Figura 18: Insertos micro-estruturados projectados para o molde	29
Figura 19: Balanço térmico para um molde de injeção	31
Figura 20:Dimensionamento dos canais de refrigeração	35
Figura 21: Sistemas de aquecimento	37
Figura 22:Balanço térmico para um molde com sistema de fornecimento de calor	38
Figura 23: Volume de controlo diferencial	39
Figura 24:sólido semi-infinito	41
Figura 25: Modelo utilizada na simulação numérica	41
Figura 26 Modelo utilizada na simulação numérica.....	41
Figura 27: Esquema do sistema de alimentação	49
Figura 28: Tempo de enchimento.....	52

Figura 29:a) Dimensões das grandezas r_1 e r ; b) Distribuição dos cartuchos.....	58
Figura 30: Temperatura das peças	63
Figura 31:Esquema das linhas do sistema de controlo de temperatura (bucha).....	63
Figura 32: Esquema das linhas do sistema de controlo de temperatura (cavidade)	64
Figura 33:Esquema do sistema de controlo de temperatura (Bucha+Cavidade).....	64
Figura 34: Tempo de enchimento	65
Figura 35: Modelo 3D da cavidade.....	66
Figura 36:Modelo 3D em vista explodida de uma metade do molde (cavidade).....	67
Figura 37:Modelo 3D em vista explodida de uma metade do molde (bucha)	68
Figura 38: Esquema placas extractoras.....	70
Figura 39: Pino guia placas de extracção	70

Índice de tabelas

Tabela 1: Sistemas de aquecimento/arrefecimento para moldes.....	17
Tabela 2: Materiais tipicamente utilizados em microinjecção.....	20
Tabela 3:Características de máquinas de micro injecção	25
Tabela 4:Geometria e dimensões dos sistemas de alimentação para moldes de microinjecção	30
Tabela 5:Função erro de Gauss	43
Tabela 6:Propriedade Físicas Orvar Supreme.....	45
Tabela 7: Propriedade Mecânicas Orvar Supreme	45
Tabela 8:Propriedades Físicas do aço Impax Supreme	45
Tabela 9: Propriedades Mecânicas do aço Imprax Supreme	45
Tabela 10: Perfil de velocidade do fuso	46
Tabela 11 Parâmetros da máquina injectora <i>Euro Inj D-65</i>	47
Tabela 12: Propriedades PC (Policarbonato)	51
Tabela 13: Diâmetro das linhas de água	55
Tabela 14: Características do cartucho.....	58
Tabela 15: Lista de componentes da ferramenta moldante.....	69
Tabela 16: Caderno de encargos	71

1. Introdução

1.1. Objectivos

Actualmente, a moldação por injeção de termoplásticos é um dos principais processos de conformação de materiais poliméricos, dada a complexidade de peças que é possível moldar e a precisão conseguida na sua produção.

Com o crescente consumo de micro-componentes e sistemas com micro-componentes incorporados, a microinjecção de termoplásticos tem ganho importância no seio tecnológico e industrial.

Com esta tese pretende-se projectar uma ferramenta moldante, um molde de investigação, capaz de produzir micro-componentes em diferentes materiais poliméricos. Para tal ser possível, procedeu-se ao estudo de algumas soluções que se preconizam vir a minimizar os problemas associados ao processamento de peças de microinjecção. Desde o sistema de alimentação, passando pela geometria da ferramenta, até ao sistema de controlo de temperatura, a ferramenta moldante projectada, propõem-se reproduzir micro-componentes de geometrias complexas e com capacidade de injeção de uma vasta gama de materiais poliméricos.

Como auxílio ao projecto, foram utilizadas quer metodologias analíticas, quer ferramentas de simulação numérica, de modo a fundamentar as escolhas inerentes aos diferentes sistemas funcionais em estudo.

1.2. Enquadramento

A crescente miniturização de sistemas tecnológicos faz com que, cada vez mais, seja necessário recorrer a microsistemas electromecânicos, e até mesmo a nano-sistemas electromecânicos, produzidos em massa. Há largos anos que se recorre à moldação por injeção como forma de produção massiva de componentes poliméricos e é desejável que a mesma tecnologia possa ser utilizada para a produção de micro-componentes.

Existem no mercado algumas máquinas dedicadas a esta função, contudo, a indústria de moldes portuguesa conta com um número diminuto de máquinas de microinjecção. Na esmagadora maioria, as empresas de injecção de polímeros possuem no seu parque de máquinas, equipamentos de injecção acima das 60 toneladas.

Com este trabalho, pretende-se estender a tecnologia de microinjecção à indústria de moldes portuguesa e criar novas oportunidades de negócio, pela abertura de novos mercados, utilizando contudo o equipamento existente. Para tal será necessário adaptar a tecnologia de moldação por injecção de termoplásticos à escala micro, inferindo alterações ao processo e à ferramenta moldante. A cavidade moldante passará a ser um inserto microestruturado, que é acoplado à ferramenta moldante.

O processo cíclico sofrerá algumas alterações, nomeadamente, a cavidade após ser selada é aquecida acima da temperatura de transição vítrea do material polimérico a injectar. O termoplástico, depois de aquecido na unidade de plasticização da injectora, é injectado na cavidade moldante. Inicia-se então a fase do controlo de temperatura e do polímero. Uma vez atingida a temperatura de extracção, as peças são desmoldadas e dá-se início a um novo ciclo.

1.3. Conteúdos da dissertação

Após o capítulo introdutório, é analisado no capítulo 2 o estado da arte do processo de obtenção de micro-componentes pelo processo de microinjecção. Os problemas inerentes ao processo e as soluções que permitem contornar as dificuldades, são aqui também abordados. É realizado neste capítulo uma pequena referência à injecção convencional, suas ferramentas e equipamentos, bem como ao módulo externo de controlo de injecção necessário para a adaptação do processo de obtenção de micro-componentes numa máquina injectora convencional.

A apresentação de todos os cálculos auxiliares ao projecto dos sistemas funcionais da ferramenta moldante, bem como a contextualização da utilização e parametrização da ferramenta de simulação numérica utilizada no projecto, estão presentes no capítulo 3.

No capítulo 4, são projectados todos os sistemas funcionais do molde, recorrendo ao estudo realizado no capítulo 3, bem como a apresentação dos resultados obtidos na simulação numérica realizada. Neste capítulo, também são descritos todos os componentes constituintes da ferramenta moldante projectada.

Finalmente, são apresentados no capítulo 5 as conclusões do projecto realizado e os aspectos que necessitam de uma atenção mais aprofundada, assim como propostas de alguns trabalhos futuros.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Introdução

O rápido desenvolvimento da tecnologia de microsistemas (MST), levou à crescente procura de micro-componentes em 3D. Nas duas últimas décadas, têm vindo a surgir necessidades cada vez maiores de micro-componentes e de micro-estruturas, dado o constante aumento do número de aplicações técnicas na biomedicina, na indústria farmacêutica, em fibras ópticas, na micro-electrónica, nas telecomunicações, informática de consumo, indústria automóvel, entre outras [1]. Na figura 1, apresentada de seguida, não se deve analisar isoladamente o peso relativo das actividades, mas ter em atenção o aumento do consumo de micro-tecnologia para mais do dobro.

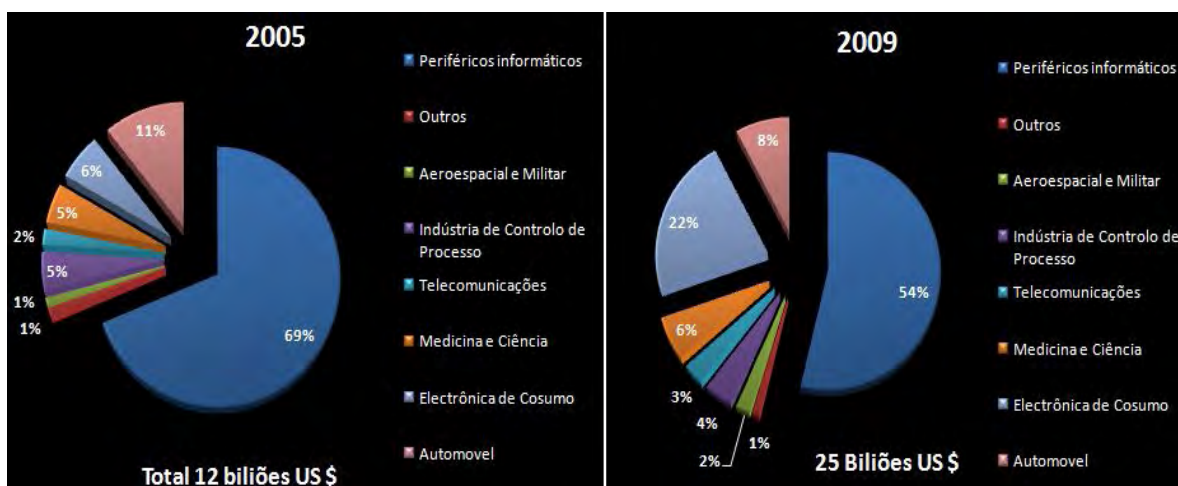


Figura 1: Tendência do mercado para as micro-tecnologias, adaptado de [2]

As aplicações da micro-tecnologia são muito diversas e distribuem-se por diversos sectores de actividade que rodeiam o nosso dia-a-dia. Os principais eixos impulsionadores do desenvolvimento de novos micro sistemas são[3]:

- Aeroespacial;
- Energia e ambiente;
- Medicina;
- TIC's (Tecnologias da Informação e Comunicação);
- Domótica e robótica industrial;

- Automóvel e transportes;
- Electrónica de consumo e conforto;

Procura-se a obtenção de produtos de alta qualidade e baixo custo. Existem muitas técnicas de produção convencional, no entanto, são incapazes de produzir peças com elevada precisão. Outras técnicas de produção de micro componentes foram desenvolvidas, tais como micro-corte, ablação por laser, decapagem de silício, tecnologia LIGA, etc, mas estas não são competitivas pelo seu elevado custo, baixa eficiência e limitação a certos materiais [1]. É neste seguimento, que a produção de micro-componentes pelo processo de micromoldação, ganha cada vez mais o seu espaço na indústria de produção de micro-componentes, derivado da sua versatilidade.

A micromoldação de termoplásticos é uma das técnicas de fabrico de micro-componentes não electrónicos mais promissoras. Com esta tecnologia, várias centenas de peças podem ser produzidas num só molde, com elevada precisão, elevada eficiência e baixo custo. Após a fabricação do inserto (figura 2), vários milhares de peças podem ser produzidas com pouco esforço. Normalmente o custo de fabricação destas peças é relativamente baixo, por ser necessária uma pequena quantidade de material para injeção [4].

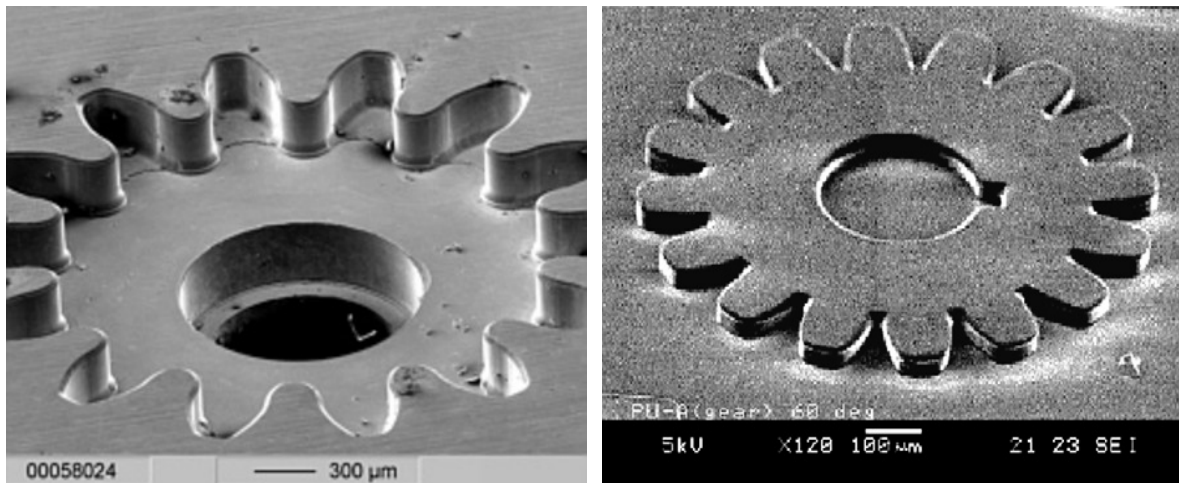


Figura 2: micro-inserto e micro-estrutura, adaptado de [5]

O desenvolvimento da micromoldação de termoplásticos começou acerca de 30 anos. Desde aí, muita experiência e conhecimento foram alcançados, o que faz com que hoje, as máquinas de microinjeção estejam disponíveis comercialmente e sejam usadas na indústria de forma já “rotineira” [6]. Outra forma de produção de micro-componentes,

consiste na adaptação de máquinas de injeção convencional, em máquinas de microinjeção. Recorrendo à utilização de uma unidade redutora acoplada à máquina injectora convencional, é possível produzir micro-componentes.

Entre os processos de micromoldação, tais como: gravação a quente (*hot embossing*), moldação por microinjeção (μ IM), moldação por injeção radioactiva, moldação por injeção de compressão e termoformação que são usados para a produção de micropeças de termoplásticos, as técnicas principais de produção são a microinjeção e a gravação a quente [6].

2.2. Micro-componentes

Os termos micro-componente ou micro-estrutura designam um componente ou uma estrutura com dimensões sub-milimétricas, ou seja, componentes ou estruturas cujas dimensões se situam na casa das centenas de micrómetros e com tolerâncias na vizinhança do micrómetro, ou mesmo abaixo deste valor [7].

Whiteside *et al*, por sua vez, aborda a definição de micro-componentes por várias perspectivas [6]:

- Micro-partes que possuem um peso com intervalo de poucos miligramas;
- Micro-partes que possuam características dimensionais na ordem do micrómetro;
- Micro-partes que exibem tolerâncias dimensionais na gama do micrómetro, mas sem limite dimensional.

A maior dificuldade em produzir este tipo de peças prende-se com o facto de ultrapassar a barreira da razão de aspecto (ou dimensão específica). Assim, a espessura das peças não pode ser desprezada no que diz respeito às outras dimensões, como acontece na moldação por injeção convencional [6].

Assim sendo, a razão de aspecto (*aspect ratio*) representa um factor muito importante no que diz respeito à produção de micro-componentes, podendo tornar-se um factor limitativo de um determinado componente ou processo. A razão de aspecto consiste na razão entre a altura ou a profundidade de um determinado componente e a menor dimensão lateral (Figura 3), que neste caso seria $\frac{L}{d}$. [3]

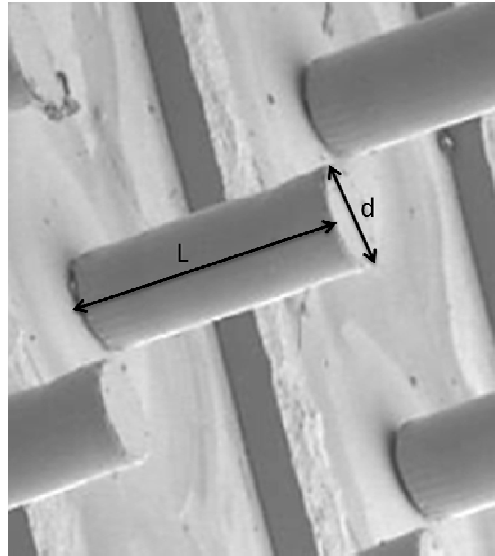


Figura 3: Razão de aspecto, adaptado de [5]

Este factor representa um enorme desafio que é colocado às técnicas de micro-fabricação, em particular aos processos de produção em massa de micro-componentes. No que se refere especificamente às técnicas de micro-fabricação, é deveras importante considerar as limitações quanto à razão de aspecto a obter [8].

2.3. Moldação de termoplásticos

2.3.1. Moldação por injeção

O termo moldação por injeção é uma descrição simplificada de um processo bastante complexo que é controlado dentro de limites específicos. O plástico fundido ou plasticizado é mantido neste estado até que seja removido, já num estado sólido, replicando a forma dada pela placa das cavidades do molde. Este, pode ser constituído apenas por uma cavidade ou por várias cavidades semelhantes ou diferentes entre si, cada uma delas ligado a um sistema de alimentação através dos canais de alimentação, que levam directamente o fluxo de polímero fundido a cada cavidade. Este processo é considerado como um dos métodos mais económicos de produzir um único componente em larga escala [9].

Podem distinguir-se três operações básicas neste processo (figura 4):

1. Subida da temperatura do polímero até um ponto em que este flua sob pressão. Isto é normalmente feito aquecendo e “mastigando” de forma simultânea o material (em forma sólida granular), até que este funda a uma temperatura elevada, constante e também a uma viscosidade uniforme. Isto é conseguido no cilindro das máquinas de injeção, que estão equipadas com um parafuso alternativo (sem-fim).
2. Injecção do material a moldar e permitir que este solidifique no molde, o qual fica fechado por acção da própria máquina. O líquido, ou seja, o material polimérico fundido proveniente do cilindro de injeção da máquina é transferido por vários canais de alimentação para as cavidades do molde, onde é finalmente moldado de acordo com a forma do objecto desejado. Forma essa, que é dada pelas características implementadas na placa das cavidades e na placa das buchas.
3. Abertura do molde para extrair a peça, após se ter mantido o material confinado sob pressão, tal como o calor (que foi adicionado ao material para o fundir) que é necessário retirar para que o plástico solidifique e para que este fique permanentemente com a forma que é desejada, para os termoplásticos.

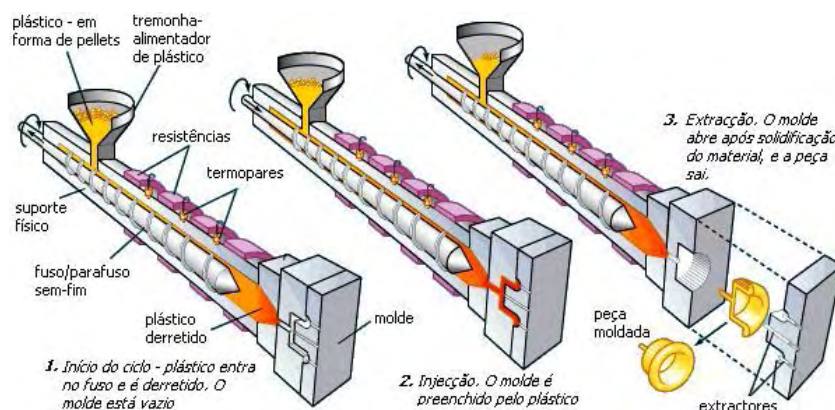


Figura 4: Processo de injeção de termoplásticos, adaptado de [10]

Estes três passos são as operações em que os inputs mecânicos e térmicos do equipamento de injeção devem ser coordenados com as propriedades fundamentais do polímero que será processado. São também as operações principais e mais determinantes da produtividade do processo, uma vez que a velocidade desse dependerá no quão rápido se pode aquecer o material polimérico até à temperatura óptima de moldação, no quão rápido se pode fazer a injeção do material e no tempo que se necessita para arrefecer o material no interior do molde.

As outras operações no processo de injeção, como o fecho do molde, extracção da peça, alimentação da máquina, etc, são também importantes no processo de injeção. A sua velocidade e efeito na produtividade vão depender normalmente de outros factores sem ser os que estão em causa quando o material está a ser processado, como por exemplo, a tipologia do sistema de injeção. De referir que todo este processo é feito ciclicamente uma vez que após a extracção da peça o fuso da máquina começa a rodar, transportando material fundido para o próximo ciclo de injeção [8].

O material polimérico é usualmente adquirido em forma de *pellet* e é aquecido na câmara de aquecimento e injeção, até que atinja um estado viscoso no qual pode ser forçado a deslocar-se para as cavidades do molde. Cada plástico difere na sua capacidade de fluir sob pressão e calor. Para se atingir o melhor resultado, a correcta temperatura de fusão, a pressão de injeção e a velocidade de preenchimento do molde devem ser determinados tendo em conta as especificidades do material e do molde utilizados. Algumas condições de moldação necessitam que ambas as variáveis, pressão de injeção e velocidade de injeção, variem durante o processo de enchimento. Um material polimérico que seja sensível ao calor pode ficar degradado se for usada uma taxa de enchimento demasiado rápida. Forçar o material polimérico através dos orifícios a uma velocidade muito alta, pode aumentar a tensão de corte e a temperatura, de tal modo, que pode ser o suficiente para causar sobreaquecimento e a degradação do polímero.

Contudo, peças relativamente finas necessitam de uma rápida taxa de enchimento para prevenir o arrefecimento do material polimérico antes que a cavidade seja preenchida correctamente. Exigentes requisitos como estes, necessitam de uma versatilidade considerável na parte de projecto da unidade de injeção. A programação de diferentes velocidades e pressões de injeção durante o avanço do parafuso ou do êmbolo, ajuda bastante no preenchimento correcto das cavidades do molde. Em algumas máquinas esta programação ou existência de multi-estágios de injeção, já vêm como equipamentos normalizados, o que traduz realmente o grande trabalho de investigação científica que vem sendo feito nesta área [8].

No processo de injeção convencional, a temperatura a que o molde se encontra antes da injeção, é sempre inferior à temperatura de fusão do material. A temperatura da superfície é lentamente aumentada devido ao calor transferido do material injectado para o molde, durante o processo de injeção e compactação. De seguida, o molde é arrefecido continuamente até à temperatura desejada para ocorrer a extracção do material (Figura 5). Os tempos de ciclo, encontram-se normalmente entre os 5s e os 30s [11]

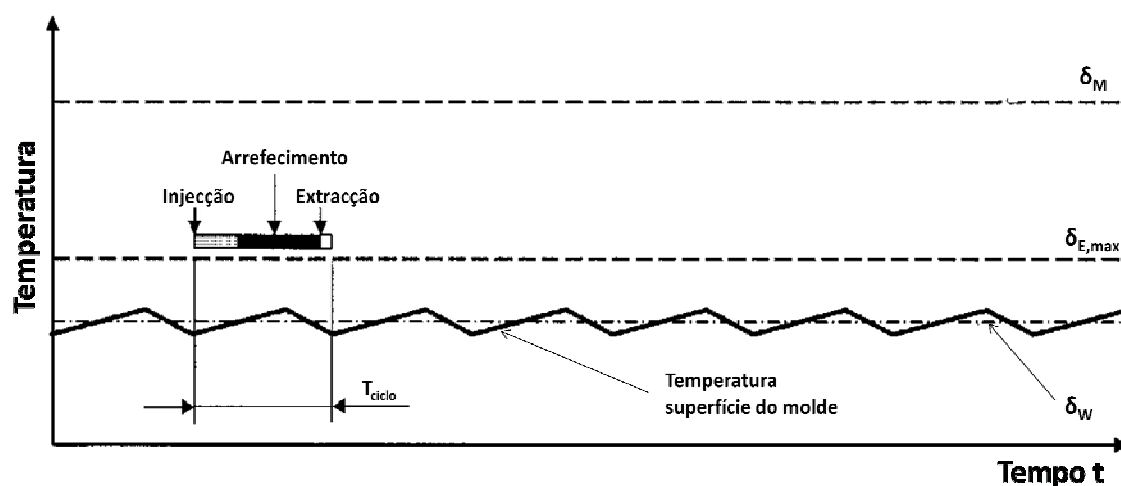


Figura 5: Processo de injeção convencional, gráfico temperatura vs tempo, com a temperatura da superfície do molde quase constante. δ_M (temperatura de fusão) e $\delta_{E,max}$ (temperatura máxima de ejeção) é mostrado em comparação com a temperatura da superfície do molde, adaptado de [11].

A unidade de fecho de uma máquina deve exercer uma força suficientemente grande de forma a resistir à tendência do movimento do material polimérico fundido a altas pressões, forçando as duas partes do molde, uma contra a outra. Se estas duas superfícies em contacto sofrerem um ligeiro afastamento, mesmo que seja apenas de uns milímetros, o material polimérico contido no interior do molde irá fluir através dessa área de contacto. É por isso que as forças de fecho dependem da área projectada do molde, de forma a evitarem que haja estas fugas de material polimérico.

2.3.2. Microinjecção

A microinjecção teve uma elevada expansão nos anos 90, devido ao desenvolvimento de equipamentos especificamente dedicados à produção de micro-componentes. A redução dramática do volume de injecção representou um dos factores que mais contribuiu para a evolução deste processo. A microinjecção é uma das tecnologias de produção mais promissoras para a fabricação de micro componentes em termoplásticos [12, 13].

Na microinjecção, podem considerar-se quatro etapas distintas no processo de fabricação:

1. **Plasticização:** durante a plasticização a unidade de injecção funde o material e, recorrendo a um fuso ou um pistão, recolhe a carga requerida para a injecção subsequente.
2. **Fecho do molde e aquecimento:** A máquina exerce uma determinada força de fecho, de forma a evitar que a pressão de injecção aplicada abra o molde. Depois do fecho do molde, para evitar que o material solidifique quando este entra em contacto com as paredes do molde, o sistema de aquecimento projectado entra em funcionamento até atingir a temperatura desejada.
3. **Injecção e compactação:** O polímero é injectado no molde a uma determinada pressão e velocidade. A pressão exercida deve garantir o enchimento do material, numa impressão com uma geometria específica, e à velocidade ajustada pelo operador.
Quando o polímero enche as cavidades do molde, tem de ser exercida uma pressão (pressão de compactação), que tem como função minimizar os efeitos da contracção do material e assegurar o total enchimento das estruturas da cavidade.
4. **Abertura do molde e extracção:** Findo o tempo de arrefecimento, o molde abre e a peça obtida é extraída.

O processo é esquematizado na figura 6.

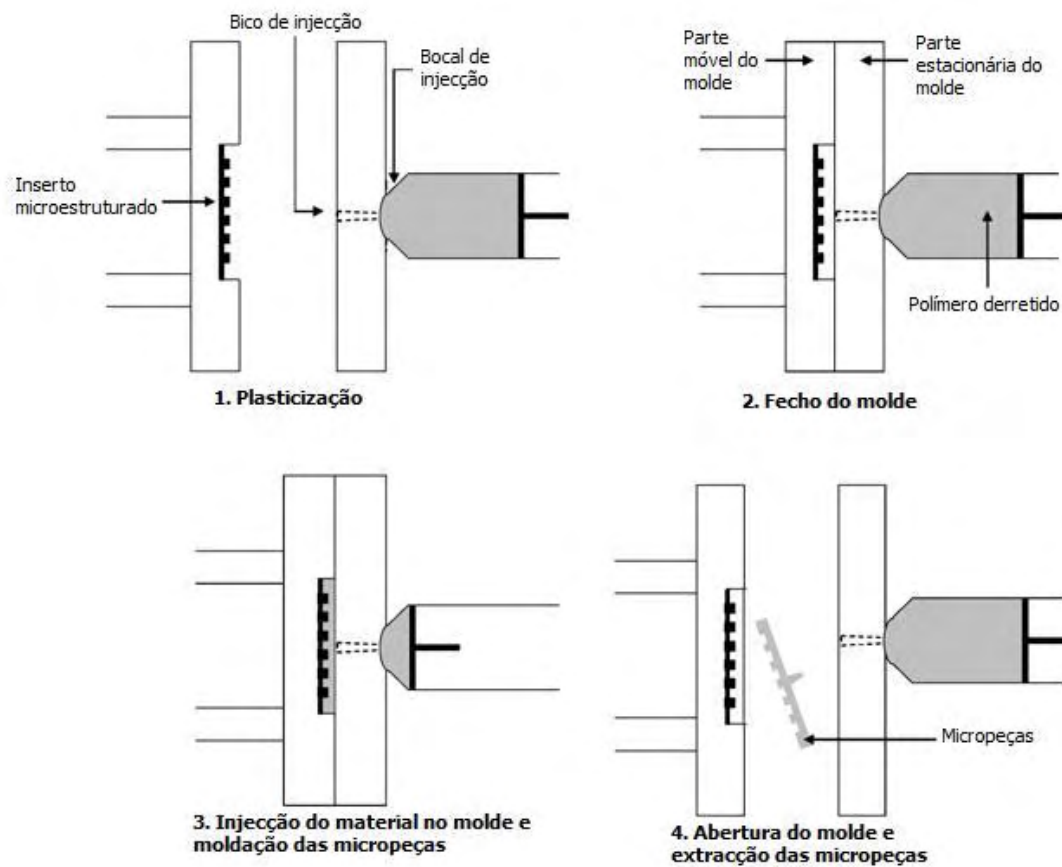


Figura 6: Processo de microinjecção de termoplásticos, adaptado de [6]

Para uma boa replicação das peças, têm de ser escolhidas condições específicas de processamento. Diferentes estudos demonstraram que os principais parâmetros de processo são [6]:

- Temperatura do molde;
- Velocidade de injeção;
- Pressão de injeção;
- Tempo de manutenção;
- Pressão de manutenção.

Nas figuras 7 e 8, verifica-se graficamente como o aumento de temperatura e o aumento da pressão de injeção influenciam positivamente o processo de microinjecção.

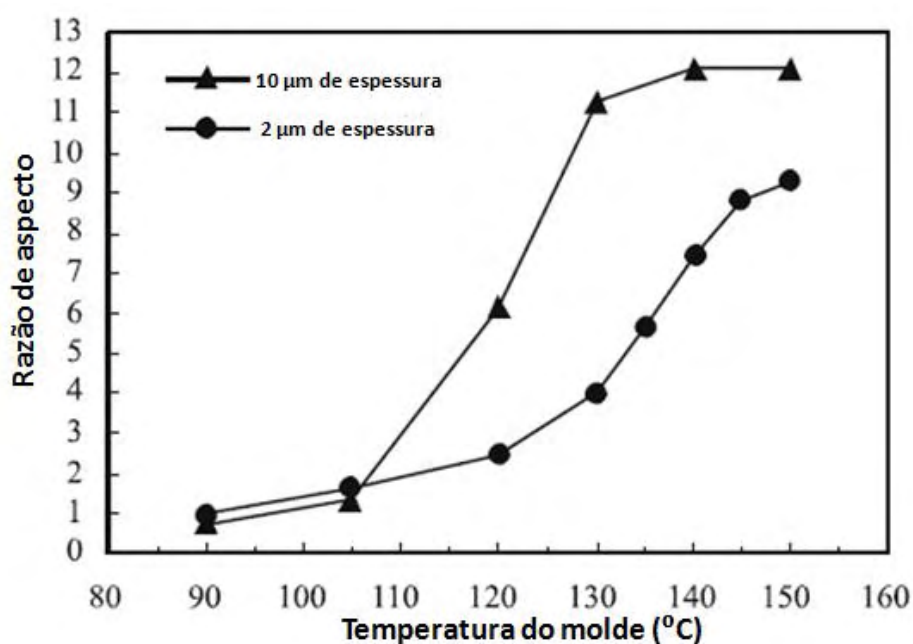


Figura 7: Efeito da temperatura do molde sobre a razão de aspecto possível de obter (Material a injectar: PMMA, Temperatura de injeção de 250 °C, pressão de injeção de 120 MPa), adaptado de [14]

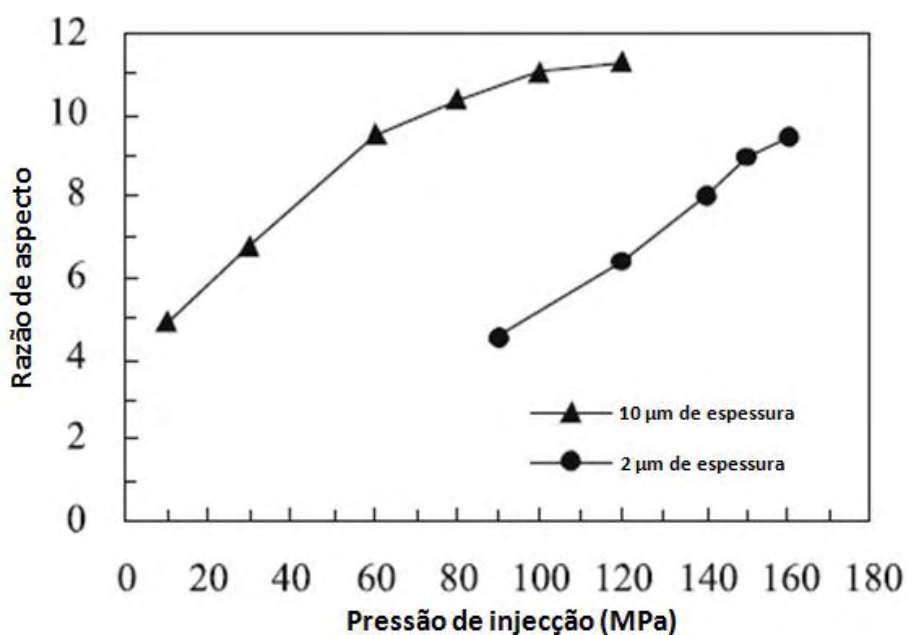


Figura 8: Efeito da pressão de injeção sobre a razão de aspecto possível de obter. (Material injectar: PMMA, Temperatura de injeção de 250 °C, Temperatura do molde 150 °C), adaptado de [14]

O facto de existir uma unidade de plasticização para fundir o polímero (máquinas de microinjecção), ou um sistema independente para fundir o polímero (unidade redutora em máquinas convencionais), permite que haja uma limitação no que ao tempo de ciclo diz respeito. O fluxo do material através de pequenos canais e orifícios, é feito utilizando altas velocidades e altas pressões, o que pode causar ou ser favorável à degradação do polímero. A fabricação de micro-componentes com elevada razão de aspecto, pode ser alcançada usando uma temperatura do molde próxima à temperatura de fusão do polímero, com dimensões estruturais na ordem dos nanómetros [6].

Esta tecnologia não consiste num processo de uma simples redução de escala do processo de moldação clássico, necessita sim, de mudanças radicais nos métodos e nas práticas de trabalho. Por isso, *Martin et al* [6] fizeram uma lista de diferentes questões tecnológicas que são necessárias ter em conta para cada componente do processo. São elas:

- Tecnologia de construção do molde;
- Aplicação de engenharia;
- Variação da matéria-prima;
- Precisão da tecnologia;
- Nano-reologia;
- Medição do processo;
- Propriedades do produto;
- Modelação do processo de moldação.

2.3.2.1. Processo Variotérmico

No processo de microinjecção, a carga térmica do polímero fundido é inferior relativamente à carga térmica do molde, pelo que o contacto do termoplástico com a cavidade, origina o arrefecimento abrupto do polímero, podendo, em muitos casos, a impressão moldante não ficar completamente preenchida, como se observa na figura 9 [6]. Para ultrapassar esta dificuldade a literatura refere a utilização de moldes com sistemas de variação de temperatura, normalmente designado de sistema variotérmico, que promove o aquecimento do molde antes da fase de injecção, de forma a obter-se um preenchimento correcto das microestruturas, e seguidamente o seu arrefecimento na fase de solidificação e extracção.

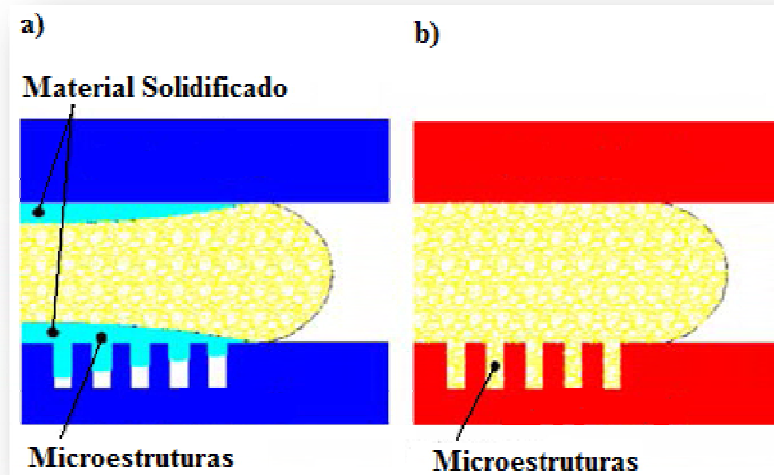


Figura 9: Problema associado a microinjeção a) Molde convencional sem aquecimento, o material entra em contacto com as paredes do molde, que se encontram a temperaturas reduzidas. Não ocorre o total enchimento das micro-cavidades; b) Molde variotérmico, molde aquecido, levando a que o material não solidifique quando em contacto com o molde, levando ao total enchimento das micro estruturas, adaptado de [15].

A utilização do processo variotérmico é então, altamente recomendável na microinjeção, não só para evitar que o material solidifique quando entra em contacto com o molde, mas também de forma a reduzir tempos de ciclo, devido às altas temperaturas necessárias para preencher as microestruturas [16].

Assim, como se pode observar na figura 10, antes da injeção, o molde é aquecido até à temperatura desejada. A temperatura do molde deve ser superior à temperatura de transição vítrea, para os materiais amorfos, e superior à temperatura de fusão, para materiais cristalinos.

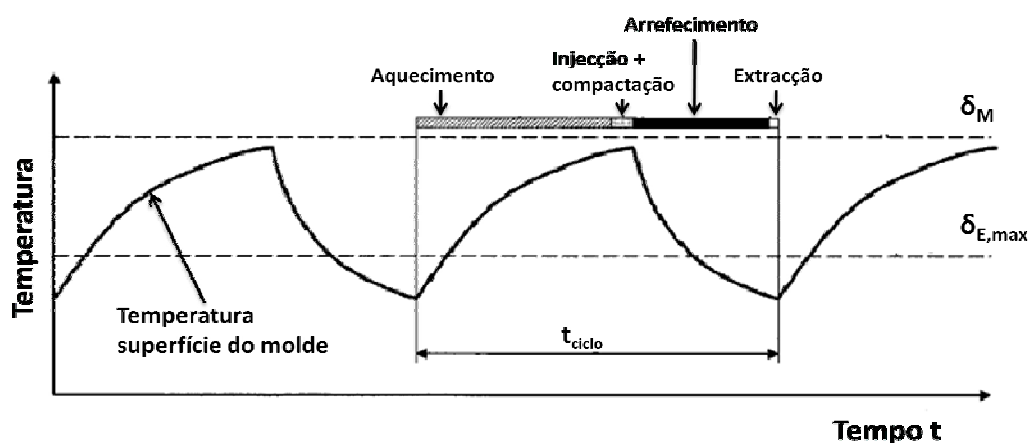


Figura 10: Processo variotérmico, gráfico temperatura vs tempo. δ_M (temperatura de fusão) e $\delta_{E,max}$ (temperatura máxima de ejeção) é mostrado em comparação com a temperatura da superfície do molde. O tempo de ciclo para com o processo variotérmico, varia entre os 10s e os 300s, adaptado de [11].

Durante o processo de enchimento, devido à pequena diferença de temperatura entre o molde e o material injectado, existe uma pequena perda de calor. Com o aumento da temperatura do molde, o total enchimento da cavidade é facilitado, podendo ser reproduzidas peças de pequenas dimensões, mas com grande razão de aspecto. Com o rápido aquecimento/arrefecimento do molde, pode ser alcançada rapidamente a temperatura de desmoldação, sendo assim possível produzir um número elevado de componentes.

Depois da matéria-prima injectada e dos insertos estarem totalmente cheios, o processo passa para a fase de compactação, que vai possibilitar o total enchimento dos insertos, a compactação e solidificação dos mesmos. Este processo é acompanhado da descida de temperatura do molde, sem a qual o inserto teria sérias dificuldades em solidificar. Para arrefecer o molde, normalmente é utilizado um sistema de linhas de água, que funciona como fluido de refrigeração. Podem também ser utilizados para o arrefecimento, óleos e fluidos de refrigeração. A água é forçada a passar pelos canais de arrefecimento. A temperatura do molde e dos insertos é rapidamente reduzida, arrefecendo assim a microestrutura com a geometria pretendida. O termopar detecta a temperatura do molde, e uma vez atingida a temperatura de extracção do material, este é aberto e a microestrutura extraída [16].

Presentemente, existem algumas soluções para o aquecimento do molde, como se mostra na tabela 1. A solução mais eficiente para o aquecimento do molde, é a utilização do método baseado na chama a gás ou por indução. O método chama de gás, garante apenas um aquecimento da superfície do molde. Por sua vez, o processo de indução, permite o aquecimento de todo o molde. Estes aparelhos são os mais caros, mas parecem constituir a melhor solução para produção em grande escala. Este método já é utilizado industrialmente para a realização de peças compostas e permite a redução do tempo de ciclo. Para a produção de pequenas e médias séries, óleos circulantes, aquecimentos eléctricos ou por infravermelhos, são geralmente utilizados [6].

Tabela 1: *Sistemas de aquecimento/arrefecimento para moldes [6]*

Sistema de aquecimento	Sistema de refrigeração	Tempo de ciclo	Superfície da ferramenta
<i>Chama a gás</i>	-	Ta aos 400 ⁰ C em 10 s	100×100×30
Rápida resposta térmica	-	Ta aos 250 ⁰ C aos 50 ⁰ C em 11 s	72×25,4×12,7
Sistema de indução	Bolsa de ar	Ta aos 220 ⁰ C aos 90 ⁰ c em 14 s	23,4×51
Sistema eléctrico	Circuito de água	Ta aos 205 ⁰ C aos 32 ⁰ c em 30 s	n/d
Infravermelhos	-	Ta aos 208 ⁰ C em 20 s	180×180
Bobines de aquecimento	Circuito de óleo	n/a	7×4×,05
Ciclo Combinado	Circuito de água	n/a	n/a
Sistema eléctrico/óleo com revestimento superfície	Circuito de refrigeração	n/a	n/a
Dispositivo <i>Peltier</i>	Dispositivo <i>Peltier</i>	Temperatura difícil controlo	n/a

Ta- Temperatura ambiente

As vantagens de utilizar do sistema variotérmico são numerosas. Na verdade, a sua utilização evita a degradação do material. O arrefecimento do material é melhor controlado e as tensões residuais e internas são inferiores. No que diz respeito aos produtos finais, a presença de linhas de soldadura e furos podem ser evitados. No entanto, este processo leva a um aumento do tempo de ciclo, comparado como o processo de injeção convencional. O elevado gradiente de temperatura a que o molde será sujeito, na ordem das dezenas a centenas de graus, também pode reduzir o tempo de vida útil do molde. Para este tipo de construções, deve ser escolhido um material com alta condutividade térmica [6].

2.3.2.2. Materiais

Numa primeira fase, os polímeros podem ser classificados em três classes: termoplásticos, termoendurecíveis e elastómeros. Os termoplásticos são os materiais mais utilizados em injeção, e são polímeros constituídos por cadeias moleculares lineares e/ou ramificadas, que fundem quando são aquecidos e solidificam depois de arrefecidos. A microestrutura dos polímeros influencia directamente as suas propriedades físicas.

Os termoplásticos podem ser classificados, de acordo com a sua morfologia molecular, como amorfos ou semi-cristalinos. Em relação aos amorfos, estes são cadeias moleculares sem qualquer arranjo cristalino particular, que quando aquecidas, se tornam moveis, fundindo e fluindo. Depois de fundindo, o polímero amorfo é enformado, e após o arrefecimento volta a ganhar a sua rigidez. Nos termoplásticos semicristalinos, as cadeias

moleculares apresentam zonas com alguma regularidade e flexibilidade suficiente para se arranjam de forma ordenada. Quando aquecidos, as regiões cristalinas permanecem intactas até o material atingir a temperatura de transição vítrea, à qual a fusão ocorre e o polímero adquire uma configuração molecular amorfa ou aleatória [23].

No que diz respeito ao escoamento dos polímeros no estado fundido, as propriedades específicas que dominam o escoamento, são a densidade, o calor específico, a viscosidade, a condutividade térmica e a difusibilidade térmica. Nos termoplásticos, estas propriedades dependem da temperatura, pressão e massa molecular.

Os polímeros, de um modo geral, são considerados materiais viscoelásticos, apresentando propriedades viscosas e propriedades elásticas. A palavra elástica, define os efeitos associados à relaxação de tensões. A componente viscosa traduz a resistência oferecida pelo polímero no estado fundido à existência de escoamento, enquanto que a componente elástica mostra a sua capacidade para recuperar parcialmente a deformação induzida.

No caso da fase de enchimento, em injeção, o polímero é considerado um fluido newtoniano generalizado, cuja viscosidade depende apenas da taxa de deformação [23].

No que diz respeito à microinjeção, os materiais utilizados estão inseridos na classe dos termoplásticos.

Os termoplásticos abrangem uma larga variedade de materiais, o que permite encontrar um polímero para uma aplicação específica. Dependendo da aplicação, os seguintes polímeros estão entre os materiais mais utilizados para a produção de micro estruturas: LCP, COC, PC, PS, EPI, PMMA, PSU, PAI, PEI, PBT, PA e POM.

Uma boa reprodução das microestruturas, pode ser alcançada com a utilização de LCP, COC. Para um bom escoamento, a utilização do PC, PA, POM, PBT, PEI, EPI e PSU é recomendável. Em materiais como o PEEK, PEI, PAI, PC e PMMA, a extracção é mais simples. Baixas taxas de contracção, na ordem dos 0.1% a 0.8% são obtidas com o LCP, COC, PAI, PEI, PPE, PS, por exemplo. Há polímeros que são estáveis a temperaturas tão altas como 250°C e outros há, que resistem a ataques químicos agressivos, como por exemplo, a soluções alcalinas, ácidos e solventes. Existem outros que são isolantes (térmicos e eléctricos), mas quando são associados e misturados com pós apropriados, podem ser usados como condutores eléctricos, libertadores de calor e até como ímanes. As estruturas micro-moldadas podem ser suaves e elásticas, quando utilizado o POM, ou duras

e rígidas/quebradiças como a aplicação do PSU. Estes são feitos de materiais transparentes tais como o COC e outros opacos, como o PA, preenchida com grafite. Para além das propriedades dos materiais, o preço, a biocompatibilidade, a compressibilidade da peça a produzir, são também factores decisivos para a selecção do material. Estas características únicas permitem aos termoplásticos serem utilizados em diversas aplicações. [17].

Alguns dos materiais mais utilizados em microinjecção são apresentados na tabela 2:

Tabela 2: Materiais tipicamente utilizados em microinjecção, adaptado de [17;22].

Material	T _m [°C]	Estrutura	T _g [k]	ρ [g/cc]	T _f [C]	Text [°C]
PMMA (Cyrus Industries XT 250)	>155	Amorfo	155	1,19	250	100
PC LNP engineering Stat-kon DCF 1004	>145	Amorfo	144	1,33	300	127
PP A shulman GMBH Polyflam RPP 1058 UHF	>230	semi-Cristalino	135	0,9	230	93
PS (BP chemicals 61H7M/IPFF-3)	>100	Amorfo	100	1,05	230	80
HDPE (tonen Chemicals J6140V)	>220	semi-Cristalino	112	0,98	220	100
LDPE (Hutsman Chemical Company PE 2038)	>200	semi-Cristalino	95	0,92	200	84
COC (Ticona Topas 6015 S-04)	>149	Amorfo	149	1,2	280	142
PEEK (Vitrex USA 4506L30)	>360	semi-Cristalino	315	1,32	360	299
PI (DuPont Europe Vespel CF30 NC)	>420	semi-Cristalino	250	1,43	420	220
PA (Mitsubishi Group-Novamid-1010C2)	>240	semi-Cristalino	186	1,18	240	130
POM (Ticona Celcon CFX-0206 Gray)	>190	semi-Cristalino	145	1,44	190	118
PVDF (Solvay ET CIE Blegium Solef 1008/001)	>220	semi-Cristalino	140	1,78	220	122
PSU (BASF Ultrason s3010)	>188	Amorfo	188	1,24	360	165
PET (Ticona Impet 320)	>280	semi-Cristalino	200	1,48	280	150
PVC (A schulman GMBH polyvin 6620-31)	>80	Amorfo	80	1,2	190	75
PFA (BIP-PF PI X05)	>320	semi-Cristalino	281	2,3	320	250
PAI (Solvay Advanced Polymers-Torlon 4203L)	>261	Amorfo	261	1,37	370	256
LCP (Ticona-Vectra A910)	>280	Semi-Cristalino	238	1,4	280	208
PPE (Asahi Kasei Corporation-Xyron 100V)	>145	Amorfo	145	1,136	280	128
PEI (GE Plastics -Ultem D8007)	>216	amorfo	216	1,28	382	200
PBT (Bayer USA-Pocan KL1-7503)	>280	semi-Cristalino	200	1,26	280	170

T_m – Temperatura do molde; *T_g* - Temperatura de transição vítrea do material; *ρ* - Densidade; *Text* - Temperatura de extracção

2.4. Ferramentas

A massificação do uso e consumo de micro-componentes, assim como as suas crescentes exigências técnicas concorrem para o desenvolvimento contínuo das técnicas de produção em série actualmente existentes, de forma a dar resposta a um mercado em crescimento acelerado.

Hoje em dia, é possível a reprodução de micro-componentes em série pelo processo de microinjecção de termoplásticos, recorrendo a dois métodos semelhantes. Máquinas de injecção convencionais tendo acoplada uma unidade redutora, ou então, recorrendo a máquinas de microinjecção já disponíveis para comercialização.

2.4.1. Máquinas de injecção convencionais

Existem muitos tipos de máquinas de injecção, que permitem por sua vez, produzir inúmeros tipos de peças de forma económica.

As máquinas de injecção de termoplásticos possuem quatro unidades principais:

- Unidade de potência;
- Unidade de injecção;
- Unidade de fecho;
- Unidade de comando;

A primeira é a responsável para transmitir energia aos actuadores da máquina que sejam accionados. Designam-se por actuadores todos os cilindros e motores hidráulicos que garantam o movimento dos vários órgãos da máquina. Esta unidade está baseada num sistema hidráulico accionado por um motor eléctrico. A unidade de injecção incorpora um sistema que é composto por um cilindro dividido em quatro secções, estando a mais quente junto ao molde, mas não isolada de modo a permitir que os gases se escapem para a atmosfera envolvente. Este sistema, alimentado pela unidade de potência possibilita o transporte, aquecimento, plasticização e homogeneização do polímero desde o sistema de alimentação até ao bico de injecção situado no interior do molde. É também, o sistema responsável pela repetitividade do processo. A unidade de fecho permite fixar o molde à máquina. Isto é, deve ser capaz de manter o molde fechado aquando da fase de injecção, suportando as pressões geradas durante a mesma, bem como, permitir a abertura do molde aquando a extracção das peças injectadas.

A unidade de comando é, tal como o nome o indica, a unidade que permite controlar as operações a executar através da monitorização das diversas variáveis do processo. Esta estabelece também a interface entre o operador e a máquina, em tempo real, podendo ser controlada remotamente.

A figura 11 representa esquematicamente uma máquina de injeção de termoplásticos convencional.

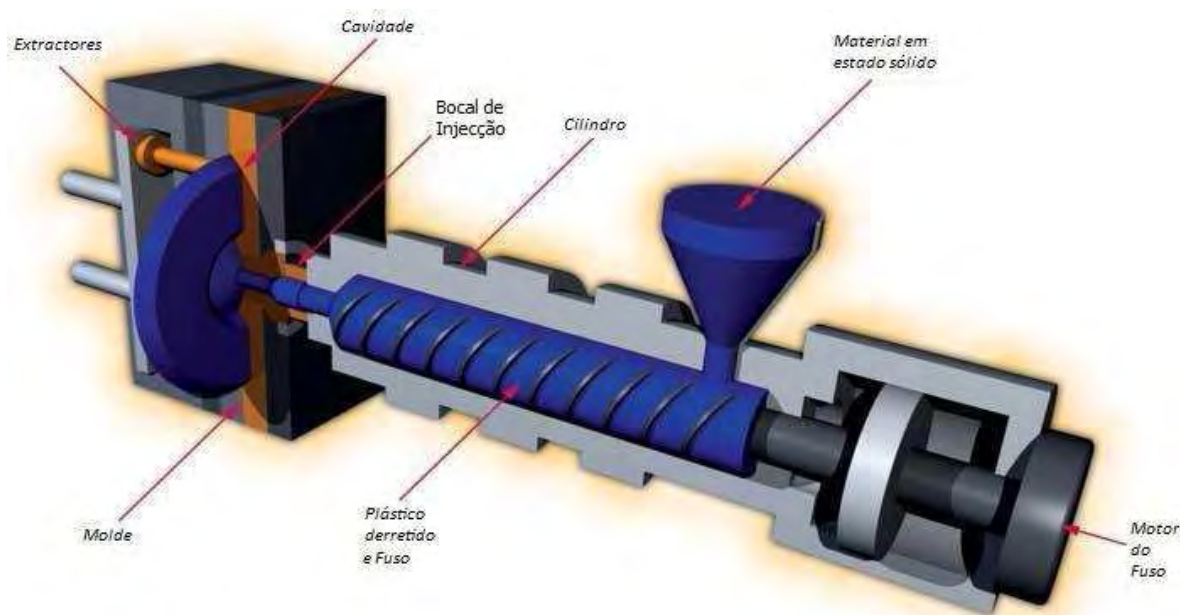


Figura 11: Máquina de injeção de termoplásticos convencional, adaptação de [10].

2.4.2. Módulo externo de controlo de injeção (unidade redutora)

De forma a conseguir utilizar as máquinas de injeção convencionais para fabricar peças por microinjecção, surgiram estudos que tiveram por objectivo verificar e projectar a aplicabilidade de um sistema externo de micro-dosagem que seja adaptável a esse tipo de máquinas.

Este sistema consiste basicamente num módulo de injeção por canais quentes embutidos e pode ser aplicado em máquinas de 30 a 100 toneladas de parafuso hidráulico alternativo, ou em máquinas totalmente eléctricas. O módulo de microinjecção é fixado entre a placa estacionária e o molde, como se pode verificar na figura 12. Assim, a função deste parafuso hidráulico será alterada, e este tornar-se-á num parafuso que serve como unidade

extrusora. Com este módulo, muitas das máquinas com estes sistemas hidráulicos alternativos sofrerão um *upgrade* para máquinas com dois estágios de injeção de precisão e terão a capacidade de fazer medições precisas para a moldação por microinjeção [4].

Devido a este módulo externo se situar entre a placa estacionária da máquina e o molde, será projectado tal como um molde de injeção de forma a ser aplicável nas máquinas de injeção (figura 13 e 14). Assim, a forma do módulo de microinjeção será como uma parte de um molde combinada com um servomotor (quanto maior for a sua potência, maior será a pressão de injeção) e um mecanismo de transmissão.

Eis algumas das características principais deste tipo de sistemas [4]:

- É um módulo externo, e pode ser aplicado em quase todas as máquinas de injeção convencionais.
- Existe um êmbolo adaptado para medir e injectar o material polimérico fundido de forma precisa.
- Um servomotor e um fuso de esferas são utilizados para se conseguir uma medição/controlo de material exacta, a velocidade de injeção elevada.
- Uma pequena célula de carga é fixada sob o êmbolo para medir a força reactiva que este sofre durante os estágios de injeção e compactação. A pressão do fluido no interior do cilindro de injeção pode assim ser medida.
- O ataque do inserto microestruturado pode ser pequeno o que irá reduzir o desperdício do material do sistema de alimentação. A razão de peso entre este e a porção total do material injectado pode ser muito menor.
- Se o volume de injeção for muito pequeno, o polímero derretido na câmara de injeção pode ser injectado mais do que uma vez na cavidade.

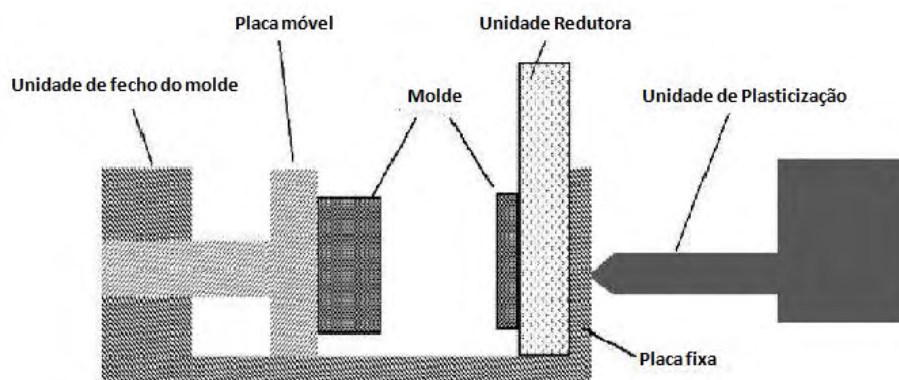


Figura 12: Esquema em corte de uma máquina convencional com o módulo externo de controlo de injeção, adaptado de [4]

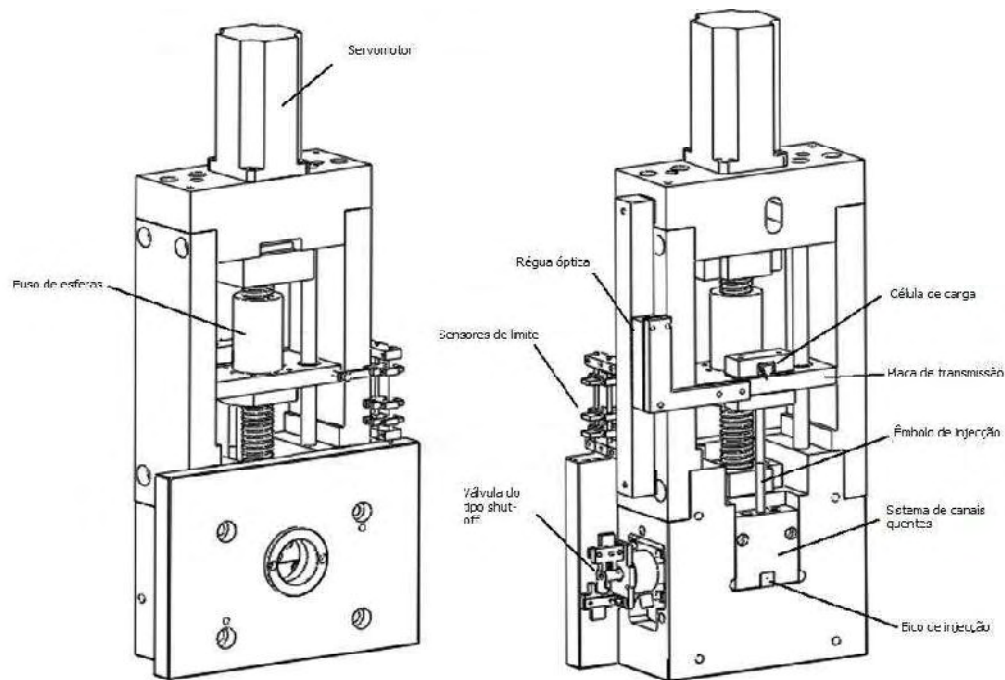


Figura 13: Esquema em corte de uma máquina convencional com o módulo externo de controlo de injeção, adaptado de[4]

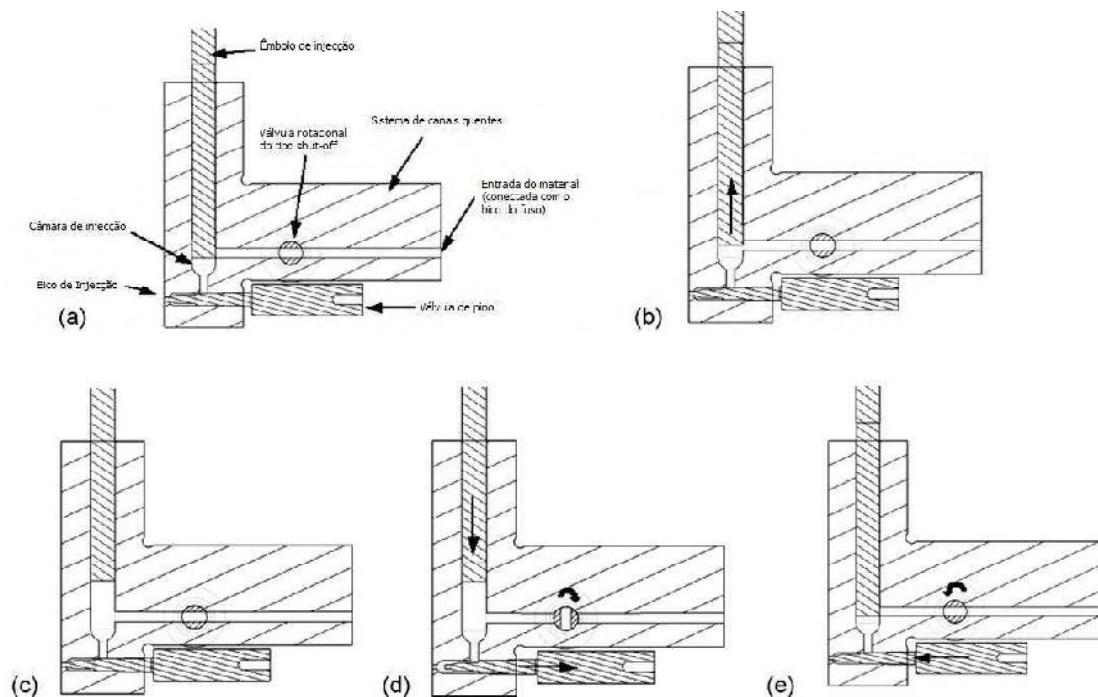


Figura 14: Esquema do processo de injeção no módulo de controlo. (a) stand by; (b) injeção de material por parte do fusão. O êmbolo move-se para cima e derrete o material necessário para o processo; (c) acaba de derreter o material; (d) a válvula de pino abre, a válvula de tipo shut-off fecha e o polímero é injectado; (e) as duas válvulas anteriores realizam o processo inverso, e termina o ciclo, adaptado de [4]

2.4.3. Máquinas de micro-injecção

Como já foi referenciado anteriormente, nos dias de hoje, graças à grande procura de micro-componentes, diversos fabricantes colocaram no mercado máquinas de microinjecção para que estas sejam comercializadas e usadas na indústria de uma forma corrente. A tabela 3 apresenta alguns dos principais fabricantes e modelos de máquinas microinjectoras disponíveis no mercado.

Tabela 3: Características de máquinas de micro injecção

Equipamento			Características			
Marca	Modelo	Ø Fuso(mm)	Pressao de injecção (MPa)	Volume injecção (cm ³)	Velocidade de injecção máxima (cm ³ /s)	Força de fecho (Ton)
Battendfeld	Microsystem 50	14	250	1.1	7.6	5.9
Ferromatik-Milacron BAbyplast	6/10P	-	265	4	6.2	6.3
Rondon	High Force 5	20	160	4.75	12.5	5
Nissei	HM7 Type	-	175	6.2	-	7
Lawton	Nano-Molfrt	-	-	0.35	-	-
Sumitono	SE7M	14	196	6.2	46	7
Arburg Allrouder	170U	155	220	10	26	12.5
FANUC ROBOSHOT	S-2000i5A	14	200	6	46	5
JMW	0155-5t	16	133	5	98	10
Dr.Boy	12 A/M	12	-	4.5	-	-

De seguida é realizada uma pequena referência a alguns dos modelos disponíveis comercialmente:

➤ Batterfeld microsystem 50

A Battenfeld Microsystem 50 (Figura 15) é um equipamento com várias soluções integradas, embora a maior parte destas sejam opcionais. Uma dessas soluções é o sistema de injecção, que garante um processo de produção estável, permitindo injecções de 0,025g. Com este sistema de injecção, o material será directamente injectado na peça ou numa pequena bolacha de material, de onde poderão derivar canais secundários (molde multi-

cavidade). Outra vantagem deste sistema de injeção é a precisão do doseamento conseguido, o doseamento por pistão permite um controlo mais eficaz sobre o volume de material a injectar, capacidade essa, que não é tão fiável nos doseamentos por fuso alternativo. Assim sendo, tempos de ciclo podem ser reduzidos significativamente [10].



Figura 15: *Battenfeld Microsystem 50* [10]

➤ **Babyplast 6/10P**

Consiste numa pequena máquina de moldação por injeção, totalmente hidráulica. É fruto da experiência adquirida nas aplicações nas áreas da medicina, electrónica, micro-mecânica e de anos de pesquisas e experiencia na área de microinjecção de materiais termoplásticos, cerâmica e cera. As principais vantagens deste equipamento são o baixo investimento realizado nos moldes, baixo custo de produção bem como a qualidade das peças produzidas. Este equipamento possibilita a produção de micro-componentes com massa compreendido entre 0,01 g até 15g.[10]



Figura 16: *Babyplast 6/10P* [10]

➤ **Boy 12 A/M**

A Boy 12 A/M foi especialmente concebida para o fabrico de micro peças com elevada precisão. É uma máquina de moldação por injeção hidráulica com dois cilindros de fixação da unidade. Este circuito fechado, que controla toda a máquina de injeção é extremamente compacto. A máquina permite uma elevada eficiência e um baixo custo na produção de micro-peça.[10]



Figura 17: Boy 12 A/M [10]

3. Ante-Projecto

Na fase de ante-projecto levaram-se a efeito todos os estudos conducentes ao projecto da ferramenta moldante. Assim neste capítulo são descritos as soluções inicialmente preconizadas, sendo que algumas delas foram mesmo colocadas de parte, por se ter provado a pouco viabilidade ou por serem de qualidade reduzida. São aqui ainda apresentados os estudos quer analíticos, quer numéricos que dizem respeito à fundamentação das escolhas e soluções apresentadas no projecto da ferramenta moldante. Para auxílio ao projecto e para validar alguns dos pressupostos, foi utilizada uma ferramenta de modelação numérica. A ferramenta escolhida foi o *Moldflow Plastics Insight 6.0®*.

3.1. Inserto

O inserto (postigo) é uma parte fundamental num molde de micro injeção. Como já foi dito anteriormente, a forma das microestruturas é determinada principalmente pela impressão que vai ser maquinada no inserto do molde. Neste projecto, a forma do inserto, pode ser observada na figura 18. Optou-se por um inserto cilíndrico, devido ao facto de a maquinagem na bucha e na cavidade ser mais fácil e menos dispendiosa.

O molde deverá incorporar 4 insertos, dois na cavidade, e dois na bucha, paralelos entre si. Com esta particularidade, ou seja, a existência de insertos na bucha e na cavidade e com as faces coincidentes, pretende-se que seja possível replicar qualquer micro estrutura desejada, o que não seria possível obter caso existissem dois insertos, ambos na bucha ou na cavidade.

No que diz respeito à fixação dos insertos ao molde, será utilizado um parafuso M5x35. Para impossibilitar que o inserto rode em torno do seu eixo, foi projectado um pino, que deverá impedir essa rotação.

A espessura máxima de trabalho é de 4 mm, (2+2). As restantes dimensões dos insertos serão apresentadas mais a frente no anexo 7.12.

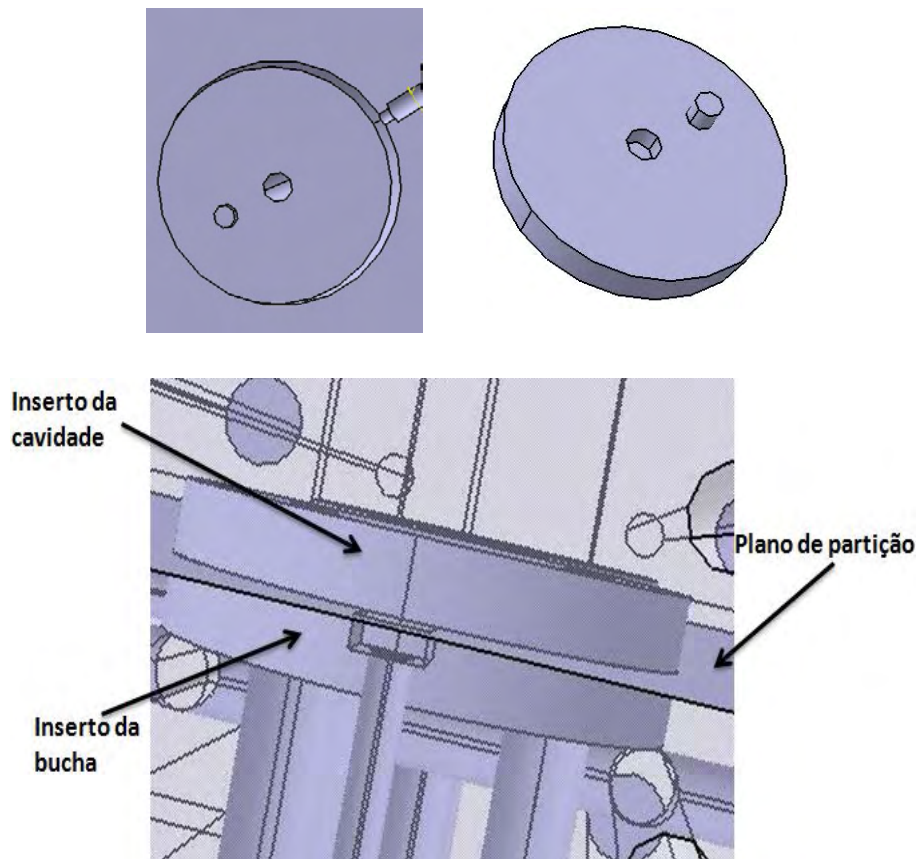


Figura 18: Insertos micro-estruturados projectados para o molde

3.2. Sistema de alimentação

O sistema de alimentação é responsável pela injeção do fundido no molde, sendo constituído por uma série de canais geralmente maquinados numa ou mais placas do molde, pelos quais o fundido é transportado desde o bico de injeção até cada zona moldante [19].

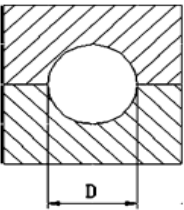
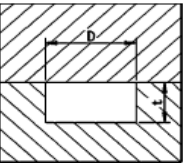
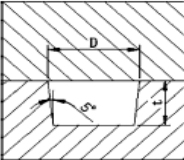
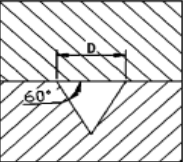
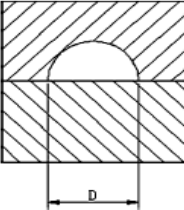
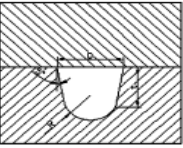
O fundido entra no molde pelo jito, que pode comunicar directamente com a impressão ou ramificar-se num sistema de alimentadores fazendo a ligação do jito às impressões. A entrada do polímero fundido nas impressões é feita através dos ataques.

O sistema de alimentação dos moldes para micro injeção, representa uma parte significativa no que diz respeito à quantidade de material injectado. O material desperdiçado no sistema de alimentação, representa em média 80% da quantidade total do material injectado no molde. De forma a reduzir as perdas de material, e visto que não é necessário injectar grandes quantidades do mesmo, as dimensões dos sistemas de

alimentação em moldes de microinjecção, são consideravelmente mais pequenas em comparação com a injeção convencional.

A forma e as dimensões típicas utilizadas em canais de alimentação, estão representadas na tabela 4.

Tabela 4: Geometria e dimensões dos sistemas de alimentação para moldes de microinjecção [15]

Forma do canal de alimentação	Dimensões	Forma do canal de alimentação	Dimensões
	$D = d = 4, 1, 0.5, 0.3, 0.1 \text{ mm}$		$D = \sqrt{2}d, t = \frac{\pi}{8}D,$ $d = 0.3, 0.1 \text{ mm}$
	$D = 1.12d, t = \frac{2}{3}D,$ $d = 0.3, 0.1 \text{ mm}$		$D = 1.35d, d = 0.3, 0.1 \text{ mm}$
	$D = \sqrt{2}d, d = 0.3, 0.1 \text{ mm}$		$D = \sqrt{2}d, R = 1.12d, t = \frac{2}{3}D,$ 0.1 mm $d = 0.3,$

3.3. Balanço térmico do molde

Durante o processo de moldação, as temperaturas em diferentes partes do molde oscilam, pois existem trocas de calor, devido ao ritmo regular do ciclo e também devido a modificações que ocorrem nas condições de processamento [18].

Para realizar o balanço térmico do molde, considera-se como positivo o calor recebido pelo mesmo, e como negativo, o valor cedido [19].

$$\sum \dot{Q}_i = \dot{Q}_{TM} + \dot{Q}_{PI} + \dot{Q}_{Amb} = 0 \quad (3.1)$$

onde,

$$\dot{Q}_{Amb} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (3.2)$$

Sendo \dot{Q}_{Amb} o calor trocado com o ambiente, \dot{Q}_{cond} o calor trocado por condução, \dot{Q}_{conv} o calor trocado por convecção, \dot{Q}_{rad} o calor trocado por radiação, \dot{Q}_{PI} o calor transportado pelo fundido e \dot{Q}_{TM} o calor transferido pelas linhas de água.

A figura 19 representa esquematicamente o balanço térmico num molde de injeção. O molde transfere calor pelos mecanismos de condução, radiação e convecção, trocando também calor com as linhas de água. A entrada de calor no sistema ocorre pela injeção do material no molde.

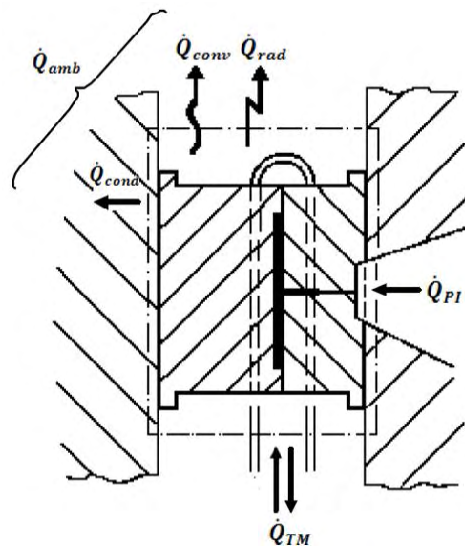


Figura 19: Balanço térmico para um molde de injeção [18]

A modelação exacta do processo de controlo de temperatura, implica mais que um estudo analítico. Assim, são aqui introduzidas algumas simplificações na análise. Os fluxos de calor individuais são considerados na forma de valores médios durante um ciclo de injeção e considerados como estacionários.

- **Calor transferido pelo fundido:**

O fluxo de calor cedido pelo fundido, durante o tempo em que a cavidade do molde permanece cheia, é dado pela seguinte expressão:

$$\dot{Q}_{Pl} = \frac{(h_{inj} - h_{ext}) \times m}{t_c} \quad (3.3)$$

Onde, m é a massa injectada de fundido, h_{inj} é a entalpia específica do plástico à temperatura de injeção, h_{ext} é a entalpia específica do plástico à temperatura de extracção e t_c o tempo de residência do material no molde.

A quantidade m é dada por:

$$m = \rho \cdot V \quad (3.4)$$

Sendo, ρ a massa específica e V o volume da moldação.

O tempo de residência do material no molde, que se pode considerar como sendo o tempo de arrefecimento, pode ser calculado recorrendo a equação de *Wübben*:

$$t_c = \frac{s^2}{\pi^2 \alpha_{eff}} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_{inj} - T_{mold}}{T_{ext} - T_{mold}} \right) \quad (3.5)$$

Em que, s é a espessura da parede, α_{eff} é a difusividade térmica efectiva média, T_{inj} é a temperatura de injeção do fundido, T_{mold} é a temperatura do molde e T_{ext} é a temperatura de extracção do polímero.

A transferência de calor para o ambiente pode ocorrer de três formas: condução, convecção e radiação.

- **Condução:**

Quando existe um gradiente de temperatura num corpo ou entre dois corpos que estejam em contacto, verifica-se uma transferência de energia das zonas de temperatura mais elevada para as termicamente mais baixas. É a chamada

transferência de calor por condução, que é proporcional ao gradiente normal de temperatura:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.6)$$

No projecto de moldes, o fluxo de calor por condução efectua-se entre para as placas de fixação do molde e é proporcional à diferença entre as temperaturas do molde e do ambiente. Pode ser calculado recorrendo a seguinte expressão:

$$\dot{Q}_{cond} = A_{fix} \beta (T_{amb} - T_{mold}) \quad (3.7)$$

Sendo A_{fix} a área de contacto do molde, β o factor de proporcionalidade e T_{amb} e T_{mold} a temperatura do meio ambiente e do molde respectivamente.

De referir ainda, que das trocas de calor para o ambiente, as perdas por condução representam aproximadamente 70 a 80% do total das perdas de calor para o ambiente. Para reduzir essas perdas, os moldes cuja temperatura seja superior a 60°C, deverão ter placas isoladoras.

- **Convecção**

O modo de transferência de calor por convecção é composto por dois mecanismos. Além da transferência de calor devido ao movimento aleatório molecular (difusão), a energia também é transferida através do movimento global, ou macroscópico, do fluido. A transferência de energia ocorre entre uma superfície sólida e um fluido.

O fluxo de calor transferido por convecção é dado pela Lei de *Newton* do arrefecimento [21]:

$$q = hA(T_p - T_{\infty}) \quad (3.8)$$

No projecto do molde, o fluxo de calor por convecção dá-se pela área lateral do molde, e pode ser calculado pela expressão:

$$\dot{Q}_{conv} = A_{lat} h (T_{amb} - T_{mol}) \quad (3.9)$$

Sendo A_{lat} a área exposta do molde, h coeficiente de transferência por convecção, T_{amb} e T_{mol} a temperatura do meio ambiente e do molde respectivamente.

- **Radiação:**

Em contraste com os mecanismos de condução e convecção, onde as transferências ocorrem através de um meio físico, a transferência de calor por radiação envolve a propagação de uma radiação electromagnética resultante da agitação térmica dos átomos do material.

A taxa líquida de transferência de calor por radiação a partir da superfície, é dada por:

$$q = A \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (3.10)$$

O fluxo de calor, em projecto de moldes, pode então ser calculado por:

$$\dot{Q}_{rad} = A_{lat} \varepsilon \sigma \left[\left(\frac{T_{amb}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{mol}}{100} \right)^4 \right] \quad (3.11)$$

Em que, ε representa o factor de emissão e σ é a constante de *Stefan-Boltzmann*.

- **Calor trocado pelo sistema de refrigeração:**

Determinados os valores da troca de calor com o ambiente (geralmente negativo, excepto quando a temperatura do molde é inferior à ambiente) e o calor libertado pelo fundido (que no caso dos termoplásticos é sempre positivo), é possível de terminar o calor transferido sistema de refrigeração, recorrendo a seguinte expressão:

$$\dot{Q}_{TM} = -\dot{Q}_{PI} - \dot{Q}_{amb} \quad (3.12)$$

O caudal do fluido de refrigeração estima-se fixando o aumento da sua temperatura durante a passagem pelo molde. Esta variação de temperatura deve ser em geral de 2 a 5°C [19]. O caudal é calculado pela equação de balanço térmico:

$$\dot{m} = \frac{|\dot{Q}_{TM}|}{C \cdot \Delta T} \quad (3.13)$$

Em que C é o calor específico do fluido e ΔT é a variação da temperatura do fluido.

3.3.1. Dimensionamento das linhas de água

Para facilitar e controlar o processo de transferência de calor, são maquinadas, perto das zonas moldantes, furos de passagem para um fluido refrigerante. Esses furos são conhecidos por “linhas de água”, pela água ser o fluido refrigerante mais frequente (e mais barato) e constituem o sistema de controlo de temperatura dentro do molde.

Depois de encontrado o valor do diâmetro (d) das linhas de água que constituem o sistema de refrigeração, procede-se ao dimensionamento dos canais e à sua colocação, como é possível observar na figura 20.

Sendo assim:

$$S_{canal} = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (3.14)$$

Então:

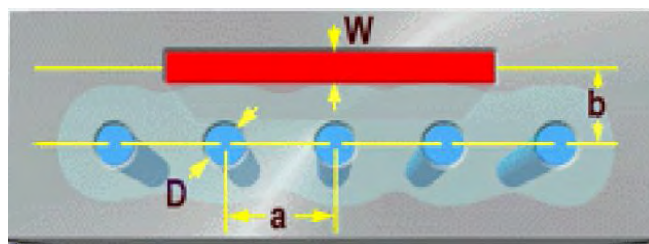


Figura 20: Dimensionamento dos canais de refrigeração [19]

$$a = 3 \times D \quad b = 2 \times D \quad (3.15)$$

Para garantir que a transferência de calor seja o mais eficiente possível, deve-se garantir que o escoamento nas linhas do sistema de controlo de temperatura seja turbulento. Assim, este regime deve ser sempre imposto como regra de projecto [19]. Isto ocorre quando o número de *Reynolds* é superior a 3500, e é determinado recorrendo a seguinte expressão:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta} \quad (3.16)$$

Onde ρ é a densidade do fluido que circula nos canais do sistema, v é a velocidade média do fluido, D é o diâmetro dos canais e η é a viscosidade dinâmica do fluido.

De forma a apurar se o molde necessita de um sistema de refrigeração, ou se por outro lado, necessita de um sistema de controlo de temperatura, a literatura sugere a seguinte expressão [20]:

$$C_q = \frac{\dot{Q}_{amb}}{\dot{Q}_{PI}} \quad (3.17)$$

- $C_q > 0$: O calor é fornecido ao molde pelo material injectado ($\dot{Q}_{PI} > 0$) mas também o meio ambiente fornece calor ao molde $\dot{Q}_{amb} > 0$. O sistema de controlo de temperatura tem de ser projectado de forma a aumentar a refrigeração.
- $-1 < C_q < 0$: Parte do calor fornecido ao molde pelo fundido é transferido para o meio ambiente ($\dot{Q}_{PI} < 0$). O sistema de controlo de temperatura seria desprezável, no entanto, isso tornaria o molde dependente da temperatura ambiente e um arrefecimento controlado do fundido não seria possível.
- $C_q < -1$: A transferência de calor para o meio ambiente é superior ao calor transferido para o molde pelo material fundido, derivado a elevada temperatura do molde. O sistema de controlo de temperatura tem de ser projectado, não para arrefecer o molde, mas para evitar uma brusca

diminuição da temperatura do molde. A utilização de isolamento, é recomendado nestes casos.

3.4. Transferência de calor adicional

No novo cálculo para o balanço térmico, irá ter-se em conta o facto de se tratar de um molde para microinjecção. Como já foi referenciado anteriormente, um molde de microinjecção normalmente tem incorporado um sistema de aquecimento (molde variotémico) de forma a resolver os problemas associados ao arrefecimento do fundido quando este entra em contacto com as paredes do molde. A utilização de um sistema de aquecimento, possibilita aumentar a temperatura do molde, evitando assim que o fundido solidifique e possibilitando o total preenchimento das microestruturas. Existem já algumas soluções disponíveis no mercado, desde a chama a gás, passando pela utilização de infravermelhos, resistências eléctricas, sistemas de indução, etc, sendo possível alcançar temperaturas que apenas com a existência de linhas de água não seria possível de obter.

A escolha do sistema é influenciada, principalmente pela temperatura necessária, a quantidade de produção para a qual o molde é projectado, pelo orçamento disponível, entre outros. O sistema de aquecimento aqui equacionado, prende-se com a utilização de resistências eléctricas sob a forma de cartuchos. A aplicação de cartuchos neste contexto, justifica-se pela vasta gama de soluções disponíveis, tanto a nível de potência, como a nível de dimensões disponíveis, capaz de satisfazer os requisitos do projecto. Na figura 21, são apresentados alguns dos elementos de aquecimento que se equacionam para a utilização em moldes.



Figura 21: Sistemas de aquecimento [10]

3.4.1. Balanço térmico do molde variotérmico

Para o cálculo do balanço térmico no molde variotérmico, tem de se ter em conta o calor adicionado pelo sistema de aquecimento. Então, a expressão para o novo balanço térmico é dado por:

$$\sum \dot{Q}_i = \dot{Q}_{TM} + \dot{Q}_{PI} + \dot{Q}_{Amb} + \dot{Q}_{adic} = 0 \quad (3.18)$$

$$\dot{Q}_{TM} = -\dot{Q}_{PI} - \dot{Q}_{amb} - \dot{Q}_{adc} \quad (3.19)$$

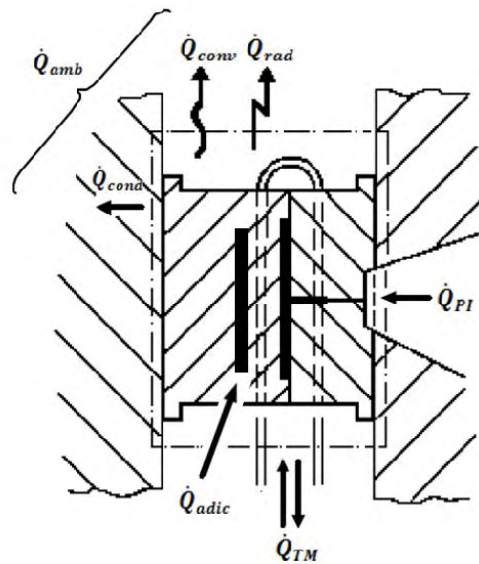


Figura 22: Balanço térmico para um molde com sistema de fornecimento de calor

Onde \dot{Q}_{adic} é o calor adicional fornecido ao molde pelo sistema de aquecimento.

O calor fornecido ao molde pelo sistema de aquecimento, é calor transferido por condução.

Os sistemas cilíndricos, muitas vezes apresentam o gradiente de temperatura apenas na direcção radial e podem portanto ser tratados como unidimensionais.

Para coordenadas cilíndricas, a forma geral, do vector fluxo de calor, e portanto, a lei de *Fourier*, é [21]:

$$q'' = -k\nabla T = -k \left(i \frac{\partial T}{\partial r} + j \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \phi} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.20)$$

Em que:

$$q''_r = -k \frac{\partial T}{\partial r} \quad (3.21)$$

$$q''_\phi = -k \frac{\partial T}{\partial \phi} \quad (3.22)$$

$$q''_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.23)$$

São os componentes do fluxo de calor nas direcções radial, circunferencial e axial, respectivamente. Aplicando o balanço de energia ao volume de controlo diferencial da Figura 23, a seguinte forma geral da equação do fluxo de calor é obtida [21]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(kr \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.24)$$

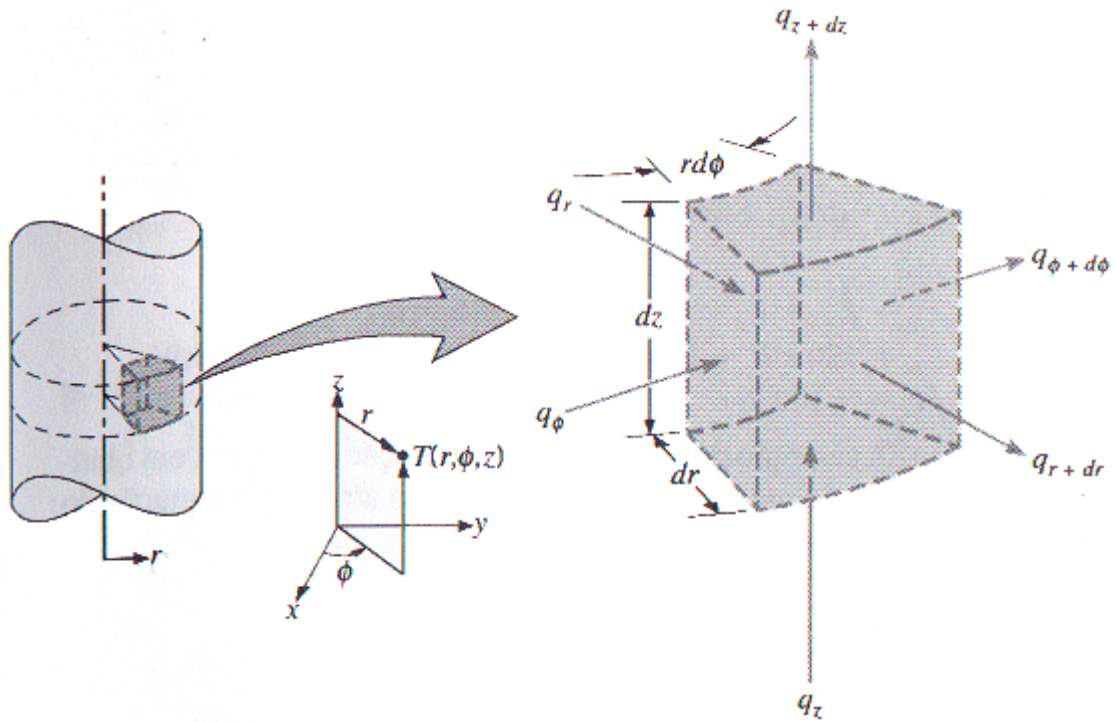


Figura 23: Volume de controlo diferencial [21]

Para condições de regime estacionário sem geração interna de calor, a forma apropriada da equação de calor é:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (3.25)$$

Considerando o valor de k constante, e integrando duas vezes, obtêm-se a solução geral:

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \quad (3.26)$$

Para obter as constantes de integração C_1 e C_2 , foram consideradas as seguintes condições fronteira:

- C_1

$$-k \frac{dT}{dr} \Big|_{r=r_1} = \frac{q}{2\pi r_1 L} \quad (3.27)$$

- C_2

$$T(r) \Big|_{r=r_1} = T_{máx} \quad (3.28)$$

Desenvolvendo as anteriores condições, vem:

- C_1

$$-k \frac{C_1}{r_1} = \frac{q}{2\pi r_1 L} \Leftrightarrow C_1 = -\frac{q}{2\pi r_1 L} \quad (3.29)$$

- C_2

$$T_{máx} = C_1 \ln(r_1) + C_2 \Leftrightarrow C_2 = T_{máx} - C_1 \ln(r_1) \Leftrightarrow C_2 = T_{máx} + \frac{q}{2\pi r_1 L} \quad (3.30)$$

Substituindo C_1 e C_2 na solução geral,

$$T(r) = \frac{q}{2\pi L K_{aço}} [\ln(r_1) - \ln(r)] + T_{máx} \quad (3.31)$$

Onde $T(r)$ é a temperatura desejada no molde, r_1 corresponde ao raio do cartucho, r corresponde a distância do centro do cartucho ao ponto onde se pretende que seja atingida a temperatura desejada, $T_{máx}$ a temperatura máxima de trabalho do cartucho e $K_{aço}$ é a condutividade térmica do material da ferramenta moldante.

3.4.2. Cálculo do tempo de aquecimento

Sabendo as características do sistema de aquecimento, é possível realizar uma estimativa para o tempo de aquecimento do molde. Para realizar o cálculo, considera-se o molde um sólido semi-infinito.

Como anteriormente foi visto, os problemas de condução em coordenadas cilíndricas, são descritos pela equação (3.24). A solução para essa equação diferencial parcial, fornece a variação da temperatura com o tempo e as coordenadas espaciais. Entretanto, em muitos problemas, apenas uma coordenada espacial é necessária para descrever a distribuição interna de temperatura. Sem geração interna e considerando a condutividade térmica constante, a eq 3.24 reduz-se a:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.32)$$

Define-se como sólido semi-infinito, todos aqueles sólidos que se estendem sem limites dimensionais em todas menos uma direcção caracterizada por uma única superfície (figura 24).

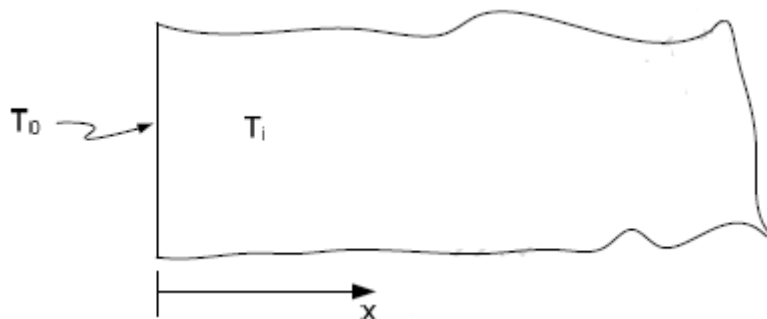


Figura 24: Sólido semi-infinito [21]

Para resolver a equação anterior, para a distribuição de temperatura $T(x, t)$, é necessário especificar uma condição inicial e uma condição de contorno,

- Condição inicial:

(3.33)

$$T(x, 0) = T_i$$

- Condição de contorno:

(3.34)

-

$$T(0, x) = T_s$$

Sem apresentar detalhes da solução do problema, a distribuição de temperatura é dada por:

$$\frac{T(x, t) - T_s}{T_i - T_s} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (3.35)$$

Onde erf é a chamada função erro de Gauss,

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (3.36)$$

Em que a função erro de Gauss é definida como ($\operatorname{erf} w$)

$$\operatorname{erf} w = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^w e^{-v^2} dv \quad (3.37)$$

e a função erro complementar é definida como ($\operatorname{erfc} w$):

$$\operatorname{erfc} w = 1 - \operatorname{erf} w \quad (3.38)$$

A tabela seguinte representa a função erro de *Gauss*:

Tabela 5: Função erro de Gauss [21]

x	erf(x)	erfc(x)	x	erf(x)	erfc(x)
0.00	0.0000000	1.0000000	1.30	0.9340079	0.0659921
0.05	0.0563720	0.9436280	1.40	0.9522851	0.0477149
0.10	0.1124629	0.8875371	1.50	0.9661051	0.0338949
0.15	0.1679960	0.8320040	1.60	0.9763484	0.0236516
0.20	0.2227026	0.7772974	1.70	0.9837905	0.0162095
0.25	0.2763264	0.7236736	1.80	0.9890905	0.0109095
0.30	0.3286268	0.6713732	1.90	0.9927904	0.0072096
0.35	0.3793821	0.6206179	2.00	0.9953223	0.0046777
0.40	0.4283924	0.5716076	2.10	0.9970205	0.0029795
0.45	0.4754817	0.5245183	2.20	0.9981372	0.0018628
0.50	0.5204999	0.4795001	2.30	0.9988568	0.0011432
0.55	0.5633234	0.4366766	2.40	0.9993115	0.0006885
0.60	0.6038561	0.3961439	2.50	0.9995930	0.0004070
0.65	0.6420293	0.3579707	2.60	0.9997640	0.0002360
0.70	0.6778012	0.3221988	2.70	0.9998657	0.0001343
0.75	0.7111556	0.2888444	2.80	0.9999250	0.0000750
0.80	0.7421010	0.2578990	2.90	0.9999589	0.0000411
0.85	0.7706681	0.2293319	3.0	0.9999779	0.0000221
0.90	0.7969082	0.2030918	3.10	0.9999884	0.0000116
0.95	0.8208908	0.1791092	3.20	0.9999940	0.0000060
1.00	0.8427008	0.1572992	3.30	0.9999969	0.0000031
1.10	0.8802051	0.1197949	3.40	0.9999985	0.0000015
1.20	0.9103140	0.0896860	3.50	0.9999993	0.0000007

3.5. Balanceamento

Os moldes com mais do que uma cavidade, destinadas à produção de peças distintas durante o mesmo ciclo de injeção, são denominados de molde família [19]. Por vezes, o tempo de enchimento de cada cavidade é diferente, originando diferenças de compactação. Ou seja, no momento em que uma das cavidades está completamente preenchida, é compactada durante o enchimento das outras. As diferenças de contracção de cada peça, conduzem a variações dimensionais e por isso, o balanceamento do enchimento é especialmente importante neste tipo de moldes.

No presente projecto, o molde destina-se também à produção de várias peças no mesmo ciclo de injeção, devido à utilização simultânea das quatro impressões do molde. Como tal, o molde projectado enquadra-se no grupo dos moldes em família, tornando-se necessário a realização do balanceamento.

3.6. Material do molde

O molde projectado, devido ao processo variotérmico que ocorre no seu interior, será sujeito a variações de temperatura muito elevadas e constantes. Atendendo a esse factor (principal), o material da cavidade e da bucha, foi escolhido o aço Orvar Supreme, fornecido pela F.Ramada Aços e Indústrias SA.

As principais características deste aço são as seguintes:

- Alto nível de resistência a choques térmicos e à fadiga térmica,
- Boa resistência a alta temperatura,
- Excelente tenacidade e ductilidade em todas as direcções,
- Boa maquinabilidade e polimento,
- Boa estabilidade dimensional durante a têmpera.

As tabelas seguintes apresentam as propriedades físicas e mecânicas, respectivamente, do material escolhido para o molde.

Tabela 6: Propriedade Físicas Orvar Supreme

Propriedades Físicas	Temperatura	20°C	400°C	600°C
	Densidade [kg/ m ³]	7800	7700	7600
	Módulo de elasticidade [MPa]	210000	180000	140000
	Coeficiente de expansão térmica a 20°C	-	12,6×10 ⁻⁶	13,2×10 ⁻⁶
	Condutividade térmica [W/m °C]	25	29	30

Tabela 7: Propriedade Mecânicas Orvar Supreme

Propriedades Mecânicas	Dureza	52 HRC	45HRC
	Resistência à tracção	1820 MPa	1420 MPa
	Elasticidade	1520 MPa	1280 MPa

Para os restantes componentes integrantes do molde, é sugerido que seja aplicado o aço Impax Supreme, fornecido pela mesma empresa. Esta escolha, devesse ao facto dos restantes componentes não estarem sujeitos a gradientes de temperatura tão elevados, como estão sujeitos a cavidade e a bucha. Este aço sugerido, é consideravelmente mais barato. As tabelas seguintes apresentam as propriedades físicas e mecânicas, respectivamente, do material escolhido para as restantes partes integrantes do molde.

Tabela 8: Propriedades Físicas do aço Impax Supreme

Propriedades Físicas	Temperatura	20°C	200°C
	Densidade [kg/ m ³]	7800	7750
	Módulo de elasticidade [MPa]	205000	200000
	Coeficiente de expansão térmica a 20°C	-	12,7×10 ⁻⁶
	Condutividade térmica [W/m °C]	29	29
	Calor específico [J/kg °C]	460	-

Tabela 9: Propriedades Mecânicas do aço Imprax Supreme

Propriedades Mecânicas	Temperatura de Teste	20°C	200°C
	Resistência à tracção [N/mm ²]	1020	930
	Elasticidade [N/mm ²]	900	900

3.7. Simulação numérica

Como já foi dito anteriormente, recorreu-se à utilização da ferramenta de simulação numérica *Moldflow Plastics Insight 6.0®* para auxílio ao projecto. Para a realização da simulação, foi modelado o sistema de peças apresentadas na Figura 25 e 26, bem como a malha refinada e corrigida que servirá como domínio de cálculo.

De modo a definir os parâmetros de injeção, procedeu-se ao cálculo da posição máxima do fuso da injectora. Depois do cálculo do volume de material polimérico a injectar e atendendo a que o diâmetro do fuso da injectora é 32 mm, alcançou-se a posição máxima do mesmo que seria 20 mm, na tabela 10 é apresentado o perfil de velocidades modelado.

Tabela 10: Perfil de velocidade do fuso

Posição do fuso	% taxa de fluxo máximo
20	60
10	60
2	60

Para calcular o tempo de manutenção, foi utilizada a equação de *Barrie*, sendo uma estimativa do tempo de compactação a inserir no projecto. Corresponde a uma equação semi-empírica válida para discos com espessura compreendida entre 2 a 5 mm, válido portanto para o caso em estudo [19].

$$Tempo\ Manutenção = \left(\frac{s}{2 \times Y \times \sqrt{\alpha}} \right)^3 \quad (3.39)$$

$$Y = \frac{T_{inj} - T_{mold}}{T_{ext} - T_{mold}} \quad (3.40)$$

Assim sendo, o tempo de manutenção foi calculado recorrendo aos valores da tabela 12, o valor do tempo de manutenção obtido foi obtendo-se o valor de 3,56 s. Para a realização da simulação, foi arbitrado o valor de 5 s.

Na tabela 11 apresentam-se os parâmetros que dizem respeito à máquina injectora utilizada. A máquina de injeção de termoplásticos utilizada no âmbito deste estudo é uma *Euro Inj D-65* da INAUTOM. Também é possível observar as características do material seleccionado para a ferramenta moldante.

Tabela 11: Parâmetros da máquina injectora *Euro Inj D-65*

Posição máxima do fuso	160 mm
Taxa máxima de injeção	67,71 cm³/s
Diâmetro do fuso	32 mm
Pressão máxima da máquina injectora	14 MPa
Razão de intensificação	12,69
Tempo de resposta do sistema hidráulico	0,2 s
Força de fecho da máquina	65 Ton

As características do material impostas para esta simulação, podem ser encontrados na tabela 6.

Utilizou-se para o estudo em questão, o sistema que se apresenta na figura 25 e 26 com a malha refinada e corrigida de modo a permitir a análise de enchimento, compactação e arrefecimento. Apresentam-se ainda de seguido, alguns dados estatísticos efectuados à malha para avaliar a sua adequabilidade e análise em questão. Os resultados das análises efectuadas serão posteriormente apresentados ao longo do capítulo 4.

Detalhes do modelo:

- Tipo da malha: Fusion;
- Relação de coincidência = 98,3%;
- Número total de nós = 2721;
- Número total de elementos = 5160;
- Volume total = 10,6190 cm³;
- Área total projectada = 25,7025 cm²

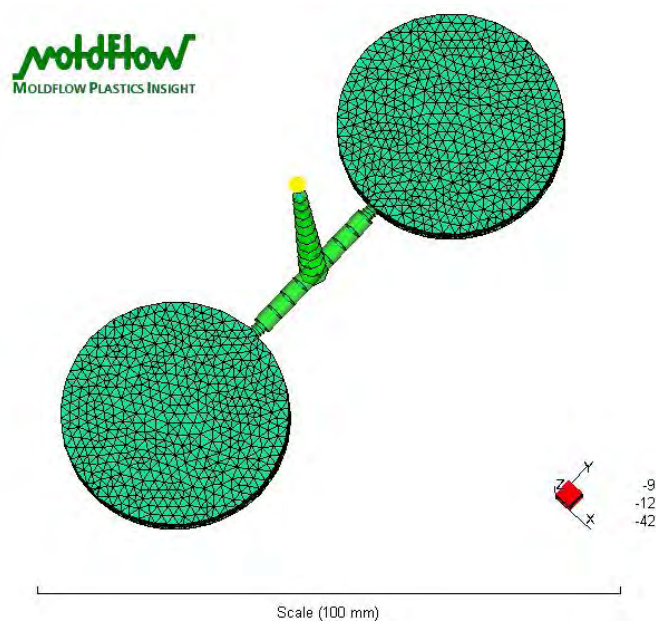


Figura 25: Modelo utilizada na simulação numérica

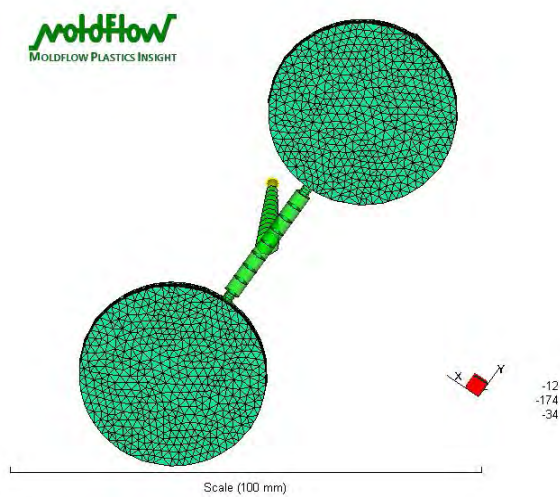


Figura 26: Modelo utilizada na simulação numérica

4. Projecto

Um projecto de moldes, obedece normalmente a um conjunto de requisitos, os quais, por sua vez, são impostos pelo equipamento de injeção, pela geometria das peças a injectar, pelo número de moldações pretendido, entre outros [19].

Todo o projecto do molde, foi realizado, tendo em conta que seria projectado para injectar duas placas circulares com 40 mm de diâmetro e 4 mm de espessura. Ou seja, este projecto, numa primeira fase, foi realizado como se estivesse a projectar um molde para injeção convencional, e só numa segunda fase, foi tratado como sendo um molde para microinjeção.

Algumas imagens relativas aos resultados obtidos na simulação numérica, que auxiliam e validam os resultados obtidos, são apresentadas ao longo deste capítulo.

4.1. Sistema de alimentação

O sistema de alimentação escolhido para o molde projectado, foi um sistema de alimentação por canais frios. O esquema dos canais frios, pode ser observado na figura 27. Esta escolha deve-se ao facto de o próprio sistema de aquecimento do molde, transferir calor para o sistema de alimentação. As dimensões do sistema de alimentação encontram-se na casa dos milímetros, o que torna também mais difícil o material solidificar quando este entra em contacto com as paredes do molde, não se justificando a utilização de canais quentes neste projecto.

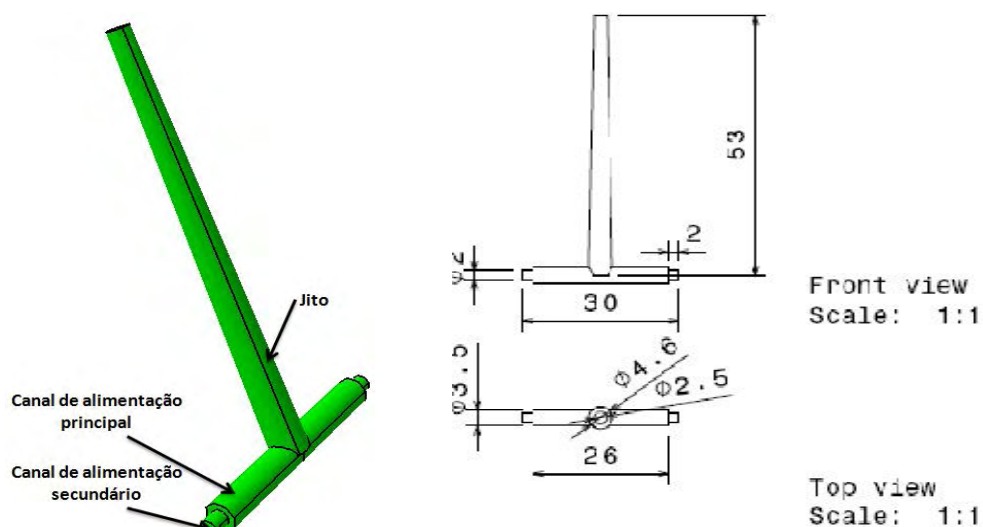


Figura 27: Esquema do sistema de alimentação

A alimentação do molde é realizada pelo topo do mesmo, como é comum na maioria dos casos. O jito possuirá uma forma cónica, devido à geometria do injector principal escolhido para integrar o molde. Os canais de alimentação principais, são também eles circulares, por ser o tipo de alimentação mais eficaz. Estes canais, vão ser maquinados tanto na bucha, como na cavidade do molde, de diâmetro de 3,5 mm. Posteriormente, existe também um canal de alimentação secundário, de diâmetro inferior ao alimentador principal, também ele circular, de forma a facilitar a injeção no micro inserto. Os canais de alimentação foram projectados de forma a serem tão curtos quanto possível, para minimizar as perdas térmicas, que são elevadas devido à sua baixa massa. De referir ainda, que os ataques, bem como o restante sistema de alimentação secundário, será posteriormente maquinado nas impressões. As dimensões do sistema de alimentação podem ser encontradas na figura 27.

4.3. Balanço térmico

Este balanço térmico tem como objectivo projectar as linhas de água do molde, ou seja, verificar que o sistema de refrigeração pode ser desprezado, dando lugar a um sistema de controlo de temperatura.

4.3.1. Pressupostos

Para a realização deste balanço, considerou-se que as peças a produzir serão dois discos, com os insertos na sua altura mínima, isto é, dois discos com 4 mm de espessura sendo que nestas circunstâncias ocorre a transferência máxima de calor do fundido para o molde.

Outro factor, prende-se com a escolha do material a ser utilizado no balanço. Optou-se por escolher o PC (policarbonato), visto que se trata de um termoplástico de engenharia de elevado consumo e bastante citado na literatura como detendo um forte potencial na produção de micro-peças. Deve ainda assim, mencionar-se o facto de este polímero deter propriedades limite e condicionantes do ponto de vista do projecto de alguns sistemas funcionais ou auxiliares da ferramenta moldante (nomeadamente a sua temperatura de fusão e a baixa temperatura de extracção do mesmo (comparando com a temperatura de fusão)).

4.3.2. Propriedades do material

Como já foi dito anteriormente, o termoplástico escolhido para realizar o balanceamento foi o PC- CMOLD *Generic Estimate* (Policarbonato). As características principais do PC estão representadas na tabela 12:

Tabela 12: Propriedades PC (Policarbonato) [22]

Nome	Valor	Unidades
Densidade (ρ)	1105	kg/m ³
Temperatura de fusão (T_f)	305	°C
Temperatura de transição vítrea (T_g)	145	°C
Temperatura de Extracção (T_{ext})	127	°C
Temperatura do molde (T_{mol})	95	°C
Calor específico de injeção (c_{pinj})	1,89	kJ/kg °C
Calor específico de extracção (c_{pext})	1,27	kJ/kg °C

4.3.3. Cálculo

Para o balanço térmico utilizou-se:

$$\sum \dot{Q}_i = \dot{Q}_{TM} + \dot{Q}_{PI} + \dot{Q}_{Amb} = 0 \quad (3.1)$$

$$\dot{Q}_{Amb} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (3.2)$$

- **Cálculo do calor transferido pelo fundido:**

Fluxo de calor cedido pelo fundido, durante o tempo em que a cavidade do molde permanece preenchida:

$$t_c = \frac{s^2}{\pi^2 \alpha_{eff}} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_{inj} - T_{mol}}{T_{ext} - T_{mol}} \right) \quad (3.5)$$

$$t_c = \frac{4^2}{\pi^2 10.5 \times 10^{-2}} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{305 - 95}{127 - 95} \right) = 25,8 \text{ s}$$

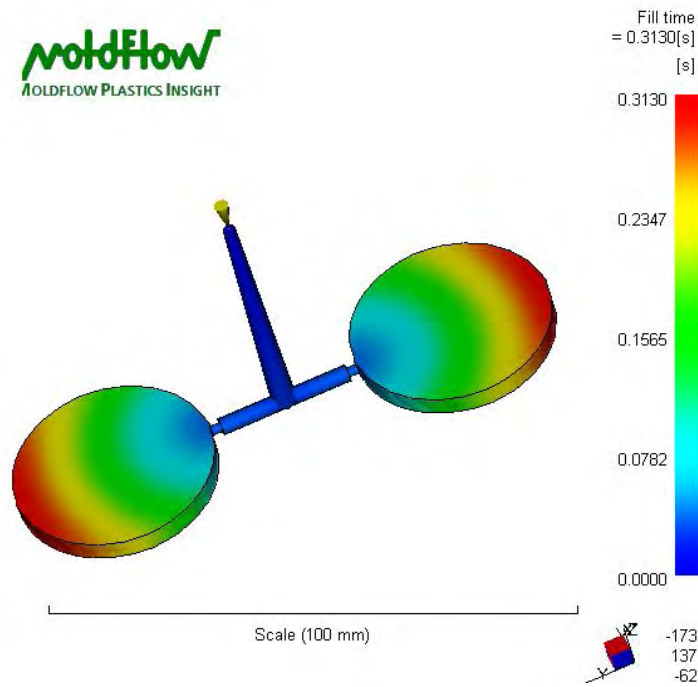


Figura 28: Tempo de enchimento

$$V_{mat} = 2 \times V_{peça} + V_{sist\ alim} \quad (4.1)$$

$$V_{mat} = 2\pi \times 0,02^2 \times 0,004 + 6,906 \times 10^{-7} = 1,074 \times 10^{-5} m^3$$

$$m_{inj} = \rho \cdot V \quad (3.4)$$

$$m_{inj} = 1105 \times 1,074 \times 10^{-5} = 0,012 \text{ kg}$$

$$h_{inj} = C_{pinj}(T_{inj} - T_{mold}) \quad (4.2)$$

$$h_{inj} = 1,89 \times (305 - 127) = 396,9 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_{ext} = C_{pext}(T_{ext} - T_{mold}) \quad (4.3)$$

$$h_{ext} = 1,27 \times (127 - 95) = 40,64 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\dot{Q}_{PI} = \frac{(h_{inj} - h_{ext}) \times m}{t_c} \quad (3.3)$$

$$\dot{Q}_{PI} = \frac{0,012 \times (396,9 \times 10^3 - 40,64 \times 10^3)}{25,8} = 163,9 \text{ [W]}$$

- **Calor trocado com o ambiente:**

$$\dot{Q}_{Amb} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (3.2)$$

- **Condução:**

$$A_{fix} = 2 \times A_{cont\ incerto} + A_{cont\ sist\ alim} \quad (4.4)$$

$$A_{fix} = 2(2\pi \times 0,02^2 + 2\pi \times 0,02 \times 0,004) + 8,308 \times 10^{-4}$$

$$A_{fix} = 6,86 \times 10^{-3} m^2$$

$$\dot{Q}_{cond} = A_{fix} \beta (T_{amb} - T_{mol}) \quad (3.7)$$

$$\dot{Q}_{cond} = 6,86 \times 10^{-3} \times 100(20 - 95) = -51,47 W$$

- **Convecção:**

Sendo $h = 15 W/m^2 \cdot ^\circ C$;

$$A_{lat} = 4(0,24 \times 0,0835) + 2(0,24 \times 0,24) = 0,195 m^2$$

$$\dot{Q}_{conv} = A_{lat} h (T_{amb} - T_{mol}) \quad (3.9)$$

$$\dot{Q}_{conv} = 0,195 \times 15 \times (20 - 95) = -219,8 W$$

- **Radiação**

Sabendo que:

$$\varepsilon = 0,25, \sigma = 5,77 \text{ W/m}^2.\text{K}^4$$

$$\dot{Q}_{rad} = A_{lat} \varepsilon \sigma \left[\left(\frac{T_{amb}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{mol}}{100} \right)^4 \right] \quad (3.11)$$

$$\dot{Q}_{rad} = 0,195 \times 0,25 \times 5,77 \left[\left(\frac{273,15 + 20}{100} \right)^4 - \left(\frac{273,15 + 95}{100} \right)^4 \right] = -65,2 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{Amb} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = -51,47 - 219,8 - 30,9 = -302,2 \text{ W}$$

▪ **Calor trocado pelo sistema de refrigeração:**

$$\dot{Q}_{TM} = -\dot{Q}_{PI} - \dot{Q}_{amb} \quad (3.12)$$

$$\dot{Q}_{TM} = -163,9 + 302,2 = 138,3 \text{ W}$$

$$C_q = \frac{\dot{Q}_{amb}}{\dot{Q}_{PI}} \quad (3.17)$$

$$C_q = \frac{-302,2}{163,9} = -1,84$$

Como $C_q < -1$, não se justifica a utilização de um sistema de refrigeração, mas sim, a utilização de um sistema de controlo de temperatura.

Para o dimensionamento do sistema de controlo de temperatura, utiliza-se de forma análoga as expressões que seriam utilizadas para o cálculo do sistema de refrigeração.

Assumindo que $\Delta T = 3$, e que para a água $C = 4186 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, então:

$$\dot{m} = \frac{|\dot{Q}_{TM}|}{C \cdot \Delta T} \quad (3.13)$$

$$\dot{m} = \frac{|138,3|}{4186 \times 3} = 0,011 \text{ kg/s}$$

Recorrendo a bibliografia para determinar o diâmetro do sistema de refrigeração, a tabela 13 sugere o diâmetro do mesmo sistema em função do caudal volumétrico (\dot{v}).

Sendo $\rho_{\text{água}} = 988 \text{ kg/m}^3$, então:

$$\dot{v} = \frac{\dot{m}}{\rho_{\text{água}}} \quad (4.5)$$

$$\dot{v} = \frac{0,011}{988} = 1,1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} = 0,67 \text{ l/min}$$

Tabela 13: Diâmetro das linhas de água [19]

Caudal [l/min]	Diâmetro [mm]
3.8	8
9.5	11
38	19
85	23.8

Como se pode observar, o caudal volumétrico não ultrapassa o valor de 3,8 l/min. O diâmetro máximo das linhas de água será de 8 mm.

Depois de encontrado o valor do diâmetro (d) do sistema de controlo de temperatura, procede-se ao dimensionamento dos canais e à avaliação de algumas das propriedades importantes:

Sendo assim:

$$S_{\text{canal}} = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (3.14)$$

Então:

$$S_{canal} = \frac{\pi \times 8^2}{4} = 50,27 \text{ mm}^2$$

- **Velocidade do escoamento:**

O diâmetro do sistema de controlo de temperatura, como foi calculado anteriormente, é de 8 mm. Como a tabela 13 sugere, para um diâmetro de 8 mm, o caudal volumico a circular nas linhas de água é de 3,8 l/min.

Sendo $\dot{v} = 3,8 \text{ l/min} = 6,33 \text{ m}^3/\text{s}$, e $S_{canal} = 5,027 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$

$$v = \frac{\dot{v}}{S_{canal}} = \frac{6,33 \times 10^{-5}}{5,027 \times 10^{-5}} = 1,26 \text{ m/s}$$

- **Tipo de Escoamento:**

Sendo $\rho_{\text{água}} = 988 \text{ kg/m}^3$ e $\eta = 8,9 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta} \quad (3.16)$$

$$Re = \frac{988 \times 1,26 \times 0,008}{8,9 \times 10^{-5}} = 11,2 \times 10^4$$

Como $Re = 11,2 \times 10^4 > 3500$, logo está-se perante um regime turbulento que à partida, deverá contribuir para um sistema de controlo de temperatura mais eficiente.

4.3.4. Cálculos sistema Variotérmico

Para o cálculo do balanço térmico do molde já com o sistema de aquecimento incorporado, utiliza-se a seguinte expressão:

$$\sum \dot{Q}_i = \dot{Q}_{TM} + \dot{Q}_{PI} + \dot{Q}_{Amb} + \dot{Q}_{adic} = 0 \quad (3.18)$$

Refira-se ainda que neste balanço térmico o material utilizado foi o mesmo que o balanço térmico anterior (PC).

- **Calor transferido pelo sistema de aquecimento:**

Para o cálculo do calor transferido pelo sistema de aquecimento, é necessário ter conhecimento da potência do cartucho seleccionado.

4.3.4.1. Escolha do Sistema de aquecimento:

O Sistema de aquecimento escolhido para o projecto prende-se com a utilização de 4 resistências eléctricas em forma de cartucho. A escolha do cartucho é influenciada pela seguinte condição:

$$T(r) < \frac{q}{2\pi L K_{aço}} [\ln(r_1) - \ln(r)] + T_{máx} \quad (4.6)$$

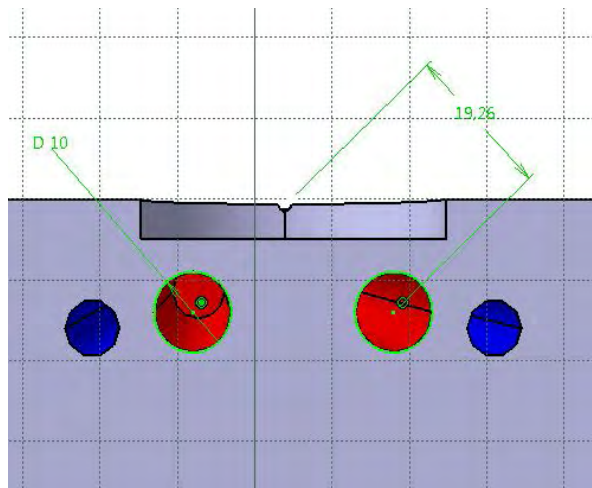
Uma vez obtida a equação anterior, foi necessário confirmar se a mesma satisfazia as condições necessárias. Após serem contactados alguns fornecedores de resistências deste tipo, foi definido, de acordo com os valores de catálogo, que os cartuchos que iriam ser alojados na cavidade com 10 mm de diâmetro teriam um comprimento de 135mm. O cartucho escolhido para este projecto, é um cartucho fornecido pela empresa Resistec, e apresenta as características apresentadas na tabela 14.

Na figura 29 são apresentadas algumas dimensões necessárias para o cálculo da potência do cartucho.

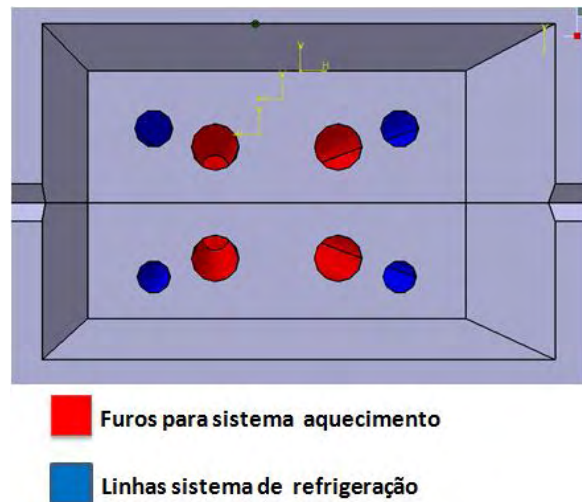
Tabela 14: Características do cartucho

Comprimento	130 mm
Diâmetro	10 mm
Temperatura máxima de trabalho	600 °C
Potência	300 W

a)



b)

Figura 29: a) Dimensões das grandezas r_1 e r ; b) Distribuição dos cartuchos

De acordo com a imagem apresentada na Figura 29 a) e b):

- $r_1 = 5 \text{ mm}$
- $r = 19,26 \text{ mm}$
- $L = 0,13 \text{ mm}$
- $K_{aço} = 29 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$
- $T(r) = 145 \text{ } ^\circ\text{C}$, para o material seleccionado.

$$T(r) = \frac{q}{2\pi L K_{aço}} [\ln(r_1) - \ln(r)] + T_{máx}$$

$$\Leftrightarrow 154 < \frac{300}{2\pi \times 0,13 \times 29} [\ln(5) - \ln(19,26)] + 600$$

$$\Leftrightarrow 145 < 582,9$$

O cartucho seleccionado satisfaz a condição anterior. Então:

$$\dot{Q}_{adic} = 300 \text{ W}$$

- **Calor transferido pelo fundido:**

Considerou-se que o calor transferido pelo fundido, será sempre menor que o calor transferido no balanço térmico anterior, derivado ao facto de o molde se encontrar a uma temperatura superior, o que influencia o tempo de residência do material no molde. Então,

$$\dot{Q}_{pl} = 163,9 \text{ [W]}$$

- **Calor trocado com o ambiente:**

$$\dot{Q}_{Amb} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (3.2)$$

- **Condução:**

$$A_{fix} = 6,86 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_{cond} = A_{fix} \beta (T_{amb} - T_{mol}) \quad (3.7)$$

$$\dot{Q}_{cond} = 6,86 \times 10^{-3} \times 100(20 - 145) = -85,75 \text{ W}$$

- **Convecção:**

Sendo $h = 15 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$;

$$A_{lat} = 0,195 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_{conv} = A_{lat} h (T_{amb} - T_{mol}) \quad (3.9)$$

$$\dot{Q}_{conv} = 0,195 \times 15 \times (20 - 145) = -365,6 \text{ W}$$

▪ **Radiação**

Sabendo que:

$$\varepsilon = 0,25, \sigma = 5,77 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

$$\dot{Q}_{rad} = A_{lat} \varepsilon \sigma \left[\left(\frac{T_{amb}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{mol}}{100} \right)^4 \right] \quad (3.11)$$

$$\dot{Q}_{rad} = 0,195 \times 0,25 \times 5,77 \left[\left(\frac{273,15 + 20}{100} \right)^4 - \left(\frac{273,15 + 145}{100} \right)^4 \right] = -65,2 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{Amb} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = -85,8 - 365,6 - 30,9 = -516,6 \text{ W}$$

▪ **Calor trocado pelo sistema de refrigeração:**

$$\dot{Q}_{TM} = -\dot{Q}_{PI} - \dot{Q}_{amb} - \dot{Q}_{adic} \quad (3.19)$$

$$\dot{Q}_{TM} = -163,9 + 516,6 - 300 = 52,7 \text{ W}$$

$$C_q = \frac{\dot{Q}_{amb}}{\dot{Q}_{PI}} \quad (3.17)$$

$$C_q = \frac{-516,6}{163,9} = -3,16$$

Neste caso, sendo $C_q < -1$, justificasse ainda mais a utilização de um sistema de controlo de temperatura.

4.4. Cálculo do tempo de aquecimento do molde

Conhecidas as características do cartucho é possível determinar o tempo necessário para que os cartuchos forneçam o calor necessário para o molde alcançar a temperatura desejada para a injeção.

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (3.36)$$

$$\alpha = \frac{29}{7800 \times 460} = 8,08 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\frac{T(x, t) - T_s}{T_i - T_s} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (3.35)$$

$$\Leftrightarrow \frac{145 - 600}{20 - 600} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)$$

$$\Leftrightarrow 0,784 = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)$$

Recorrendo a tabela da função erro de Gauss

$$\Leftrightarrow w = 0,876$$

Então:

$$0,876 = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \Leftrightarrow 0,876 = \frac{0,01966}{2\sqrt{8,08 \times 10^{-6} t}} \Leftrightarrow t = 18,81 \text{ s}$$

Este valor obtido, é atendendo que o cartucho seleccionado trabalha sempre no máximo da sua temperatura de trabalho, o que não é possível de todo acontecer. Devido a esse facto, o tempo exacto de aquecimento do molde, só é possível determinar recorrendo a ajuda de um termopar, que será colocado junto ao plano de partição, à mesma distância que se encontra o centro dos insertos dos cartuchos de aquecimento.

4.5. Sistema de controlo de temperatura

Neste projecto, não se justifica a utilização de um sistema de refrigeração, mas sim, de um sistema de controlo de temperatura. O principal facto que justifica a não utilização de um sistema de refrigeração, é a pequena quantidade de material injectado no molde, visto que se estão a injectar peças de dimensões reduzidas, constituindo uma carga térmica pequena. A principal preocupação reside no controlo do aquecimento da ferramenta moldante. O sistema de controlo de temperatura, terá então, as seguintes funções:

- Numa primeira fase, este sistema vai ter como função, aquecer a ferramenta moldante até uma determinada temperatura, muito próxima da temperatura de extracção do material polimérico a injectar. Este processo terá início algum tempo antes do primeiro ciclo de injeção. O restante aumento de temperatura estará a cargo do sistema de aquecimento do molde constituído pelas resistências eléctricas.
- Numa segunda fase, as linhas de água vão ter como principal função, a diminuição da temperatura do molde, de forma a forçar a impressão a alcançar a sua temperatura de extracção. Esta fase tem início logo após o período de injeção e compactação da micro-estrutura.
- Outra função que este sistema de controlo de temperatura irá desempenhar, é não permitir ao molde descer até temperaturas muito baixas, quando este for sujeito a vários ciclos de injeção sucessivos, minimizando o tempo de aquecimento por parte do sistema variotérmico.

Pretende-se então com este sistema de controlo de temperaturas, reduzir tempos de ciclo inerentes ao processo de moldação, e reduzir o consumo de energia associado ao aquecimento do molde através das resistências eléctricas.

4.5.1. Esquema do Sistema de controlo de temperatura

O esquema do sistema de controlo de temperatura é principalmente influenciado pela geometria da peça moldada. O objectivo é chegar à melhor geometria, de forma a arrefecer a peça o mais rapidamente e de forma eficiente.

Como é possível observar na figura 30, a temperatura das peças obtidas é mais elevada nas faces superiores e inferiores das mesmas. Assim se justifica que as linhas de água se situem paralelas e o mais perto possível dessas faces. A distância destas aos insertos, no plano vertical, é de 16 mm e foi calculada recorrendo a eq.3.15.

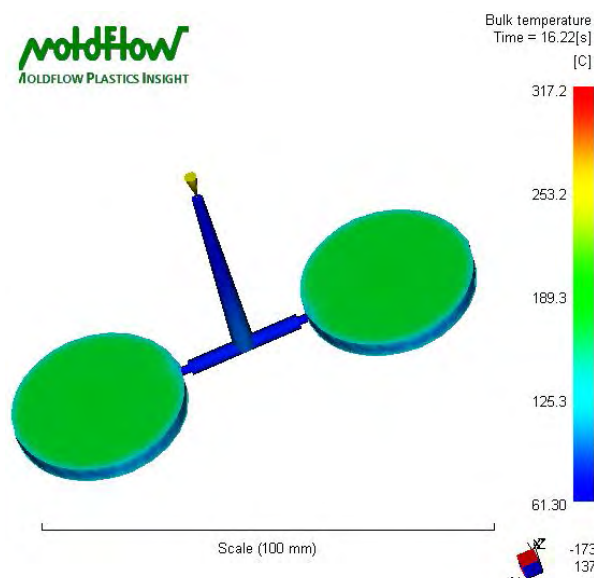


Figura 30: Temperatura das peças

O esquema do sistema de controlo de temperatura é apresentado na figura 31 e 32.

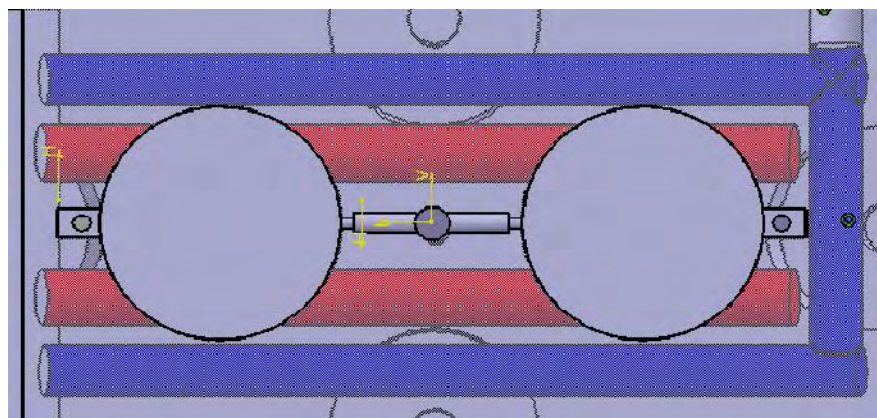


Figura 31: Esquema das linhas do sistema de controlo de temperatura (bucha)

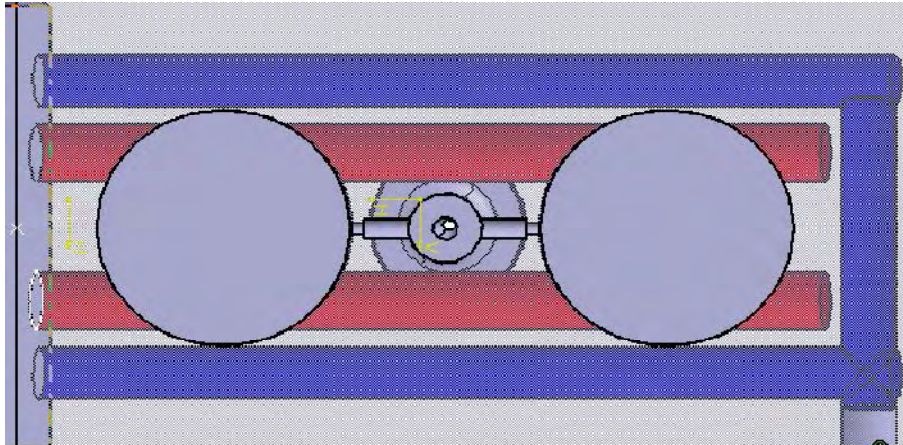


Figura 32: Esquema das linhas do sistema de controlo de temperatura (cavidade)

Na figura 33, apresenta-se o esquema utilizado durante a simulação numérica do processo.

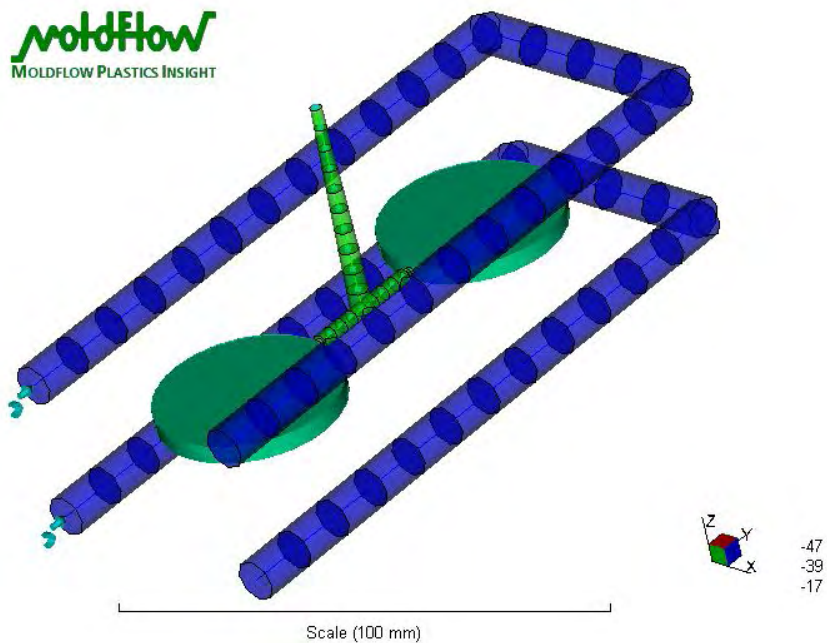


Figura 33: Esquema do sistema de controlo de temperatura (Bucha+Cavidade)

4.6. Balanceamento

O molde projectado como já foi referido, é considerado como um molde em família, devido à possibilidade de produção de componentes nas quatro impressões alojadas no molde. Na figura 34, recorrendo à ferramenta de simulação numérica *Moldflow Plastics Insight 6.0*®, foi possível verificar o balanceamento do molde. Pode se observar que o enchimento das cavidades é uniforme. De referir que esta análise pretende apenas acautelar a situação genérica e que qualquer solução particular equacionada no futuro, deve ser objecto de análise dedicada.

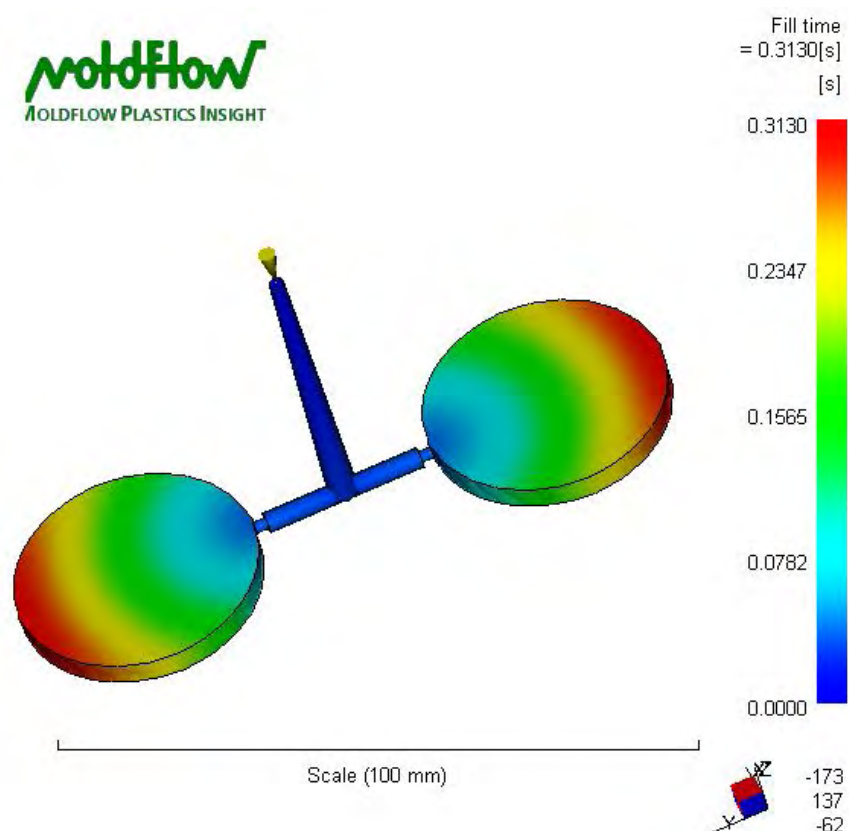


Figura 34: Tempo de enchimento

4.7. Estrutura do molde

Nas figuras seguintes (figura 35 e 36), é possível observar o esquema do molde, os seus elementos constituintes.

Na tabela 15 apresenta-se, ainda, os componentes constituintes da ferramenta moldante em análise.

A constituição da cavidade do molde é apresentada na figura 35.

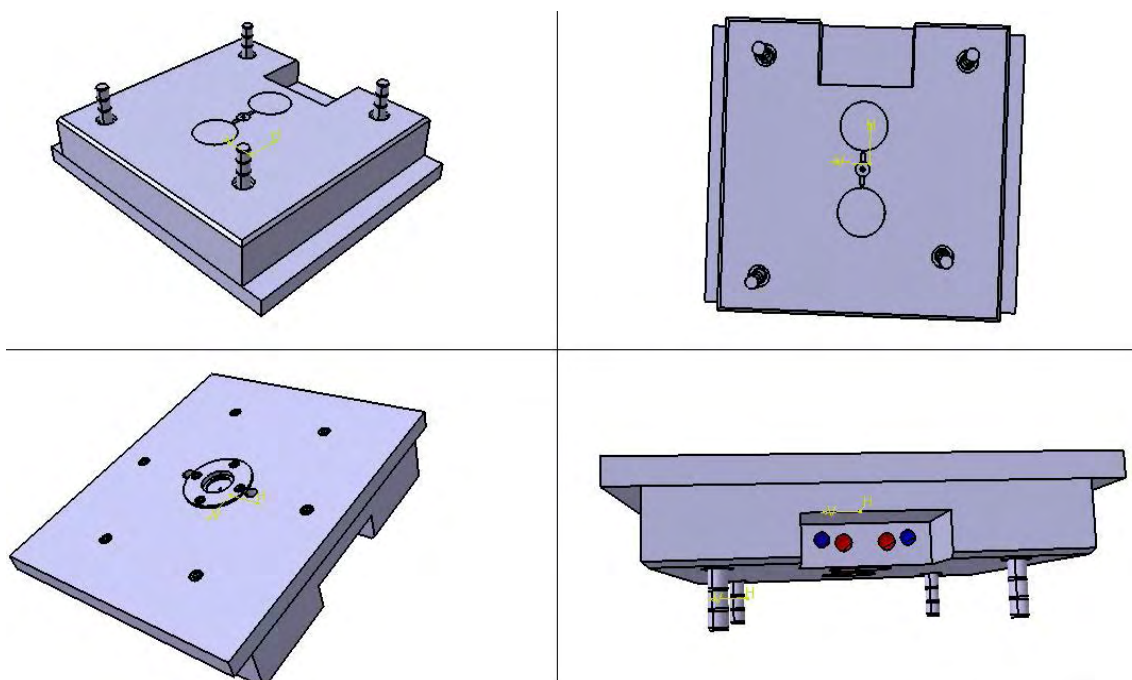


Figura 35: Modelo 3D da cavidade

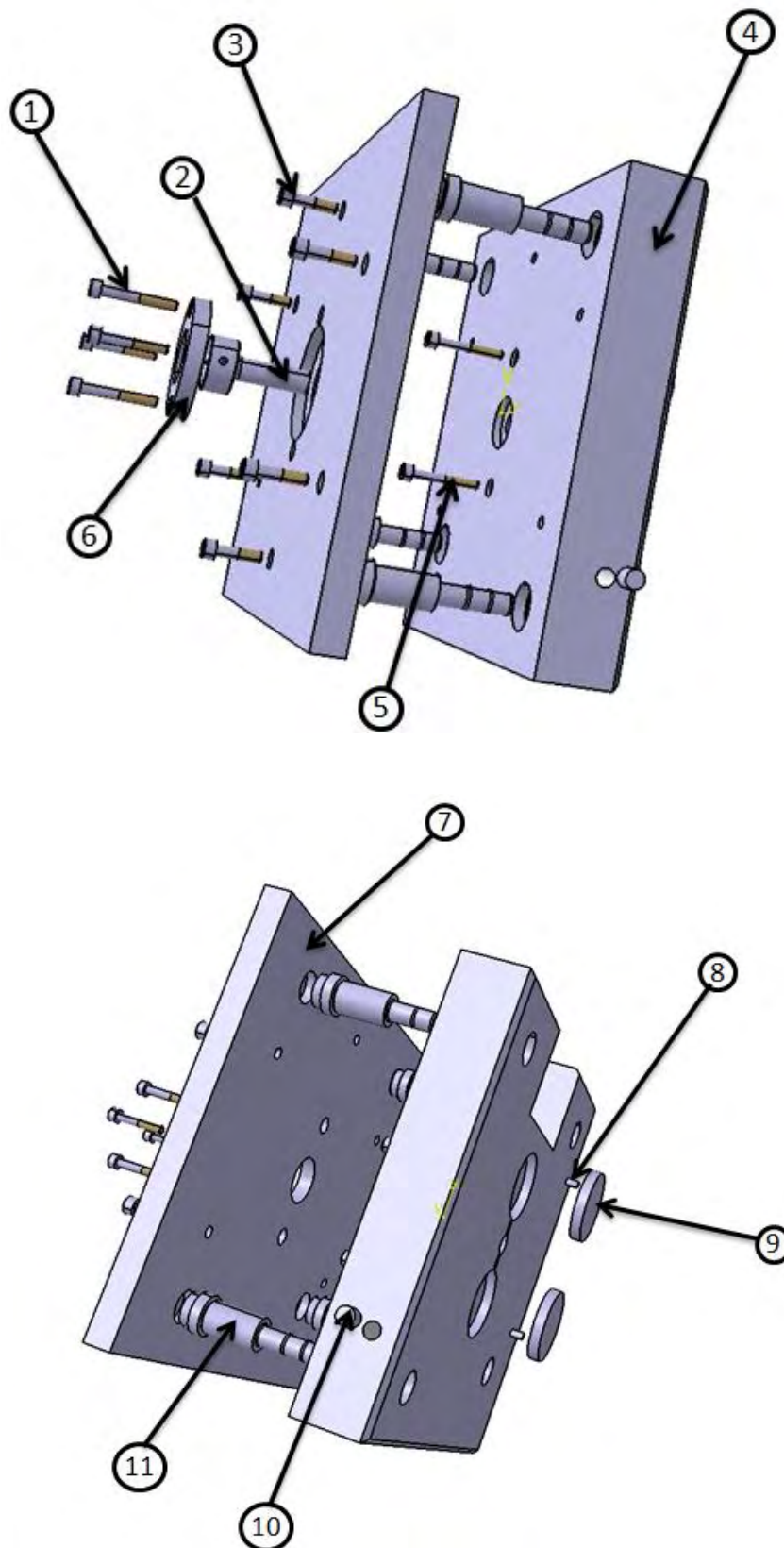


Figura 36: Modelo 3D em vista explodida de uma metade do molde (cavidade)

De seguida (figura 37), é apresentado a parte da bucha.

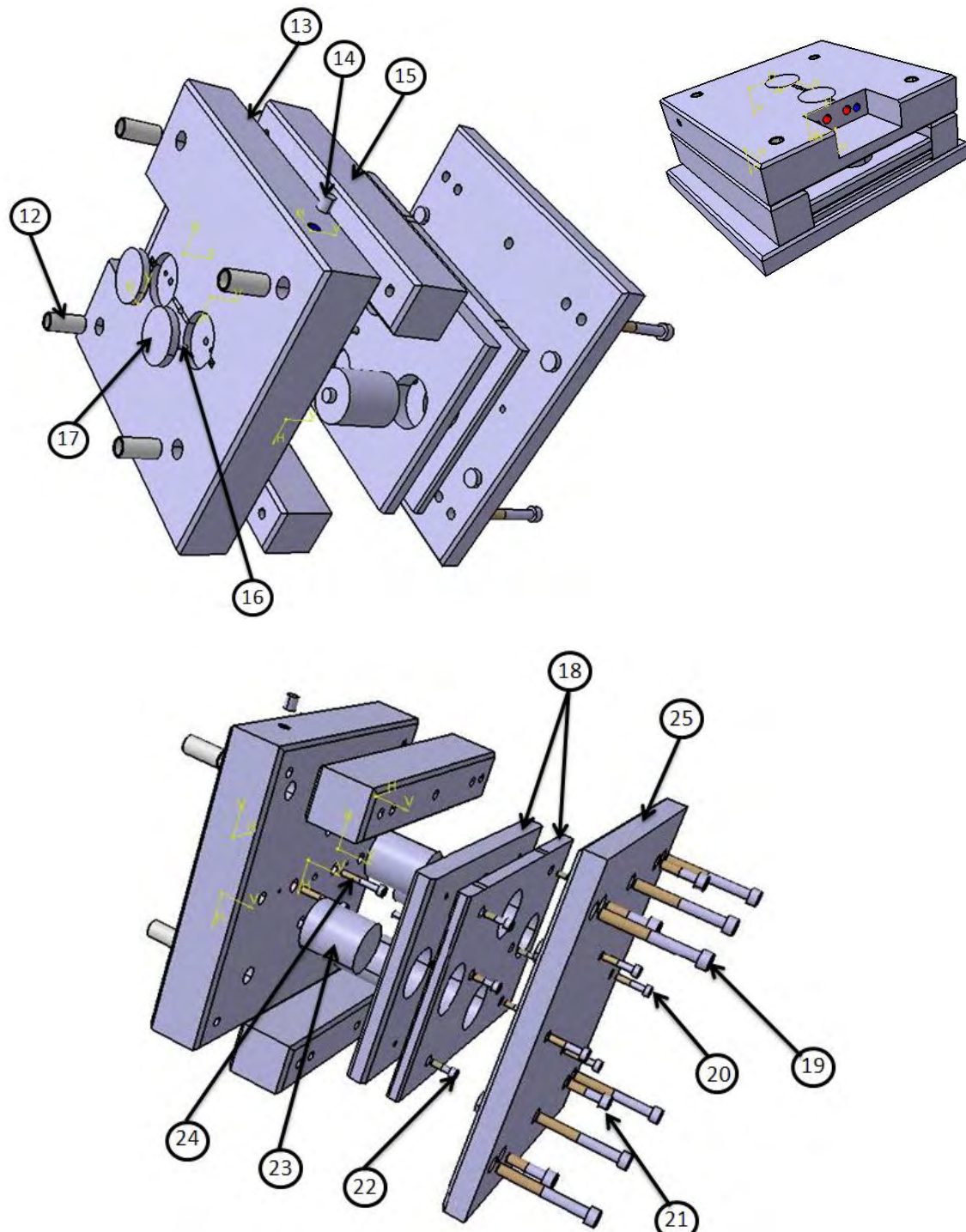


Figura 37: Modelo 3D em vista explodida de uma metade do molde (bucha)

Tabela 15: Lista de componentes da ferramenta moldante

Numero	Designação	Quantidade
1	Parafuso fixação anel de localização	1
2	Bico de injeção	1
3	Parafuso de fixação placa superior	6
4	Placa da cavidade	1
5	Parafuso fixação inserto	2
6	Anel de localização	1
7	Placa de aperto da injeção	1
8	Pino fixação inserto (cavidade)	2
9	Inserto cavidade	2
10	Tampão sistema de controlo de temperatura (cavidade)	1
11	Pino guia da cavidade	4
12	Casquilhos (bucha)	4
13	Placa da bucha	1
14	Tampão sistema de controlo de temperatura (bucha)	1
15	Calços	2
16	Pino fixação inserto (bucha)	2
17	Inserto bucha	2
18	Placa extractora	2
19	Parafuso fixação da base	6
20	Parafuso fixação guias	4
21	Parafuso fixação da base	4
22	Parafuso fixação placa extractora	6
23	Guias placa extractora	4
24	Pino fixação inserto (bucha)	2
25	Placa de aperto da extracção	1

4.8. Sistema de extracção

Devido à contracção do material e consequente adesão às paredes do molde, a peça tende a ficar presa na ferramenta, geralmente, na bucha. Soluções específicas são necessárias para a extrair. Na figura 38, é possível observar o esquema do sistema de extracção.

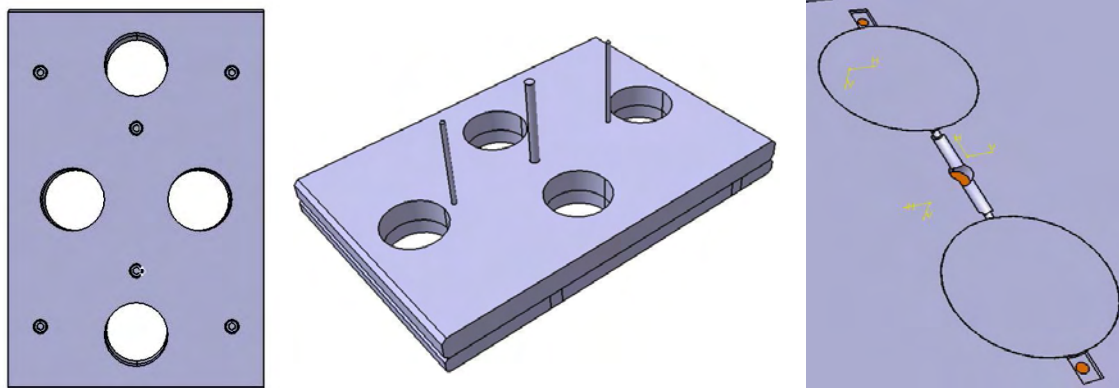


Figura 38: Esquema placas extractoras

Um dos grandes problemas de microinjecção, é a extracção dos componentes produzidos, derivado das pequenas dimensões dos mesmos. Como tal, optou-se, neste projecto pela utilização de um extractor no poço frio do sistema de alimentação, devido ao facto de a maior quantidade de material estar contido no sistema de alimentação. Foram também projectados mais dois extractores de auxílio à extracção, colocados nas extremidades das impressões. Para auxiliar o guiamento das placas extractoras, foi preconizada a utilização de quatro pinos guia (figura 39).

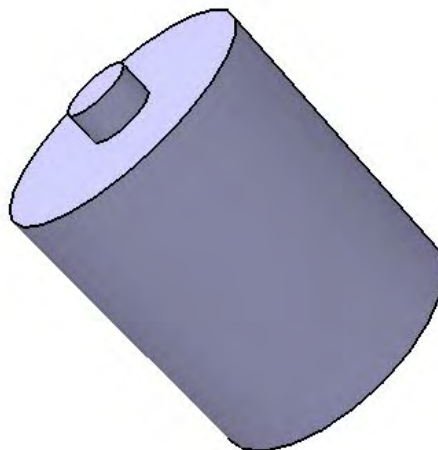


Figura 39: Pino guia placas de extracção

4.9. Caderno de encargos

Para a realização deste caderno de encargos da ferramenta moldante, foram tidos em conta alguns critérios já referenciados anteriormente. Assim, fez-se uma tentativa de minimização dos custos associados à produção de peças não normalizadas, bem como, se procedeu sempre que possível, à escolha de componentes com a melhor razão custo/benefício. Assim sendo, foram realizados contactos com empresas especializadas na produção, fabrico ou representação dos diferentes componentes da ferramenta moldante projectada.

Na tabela 16, estão apresentados todos os custos associados à produção do molde projectado nesta tese, onde não estão associados os custos relativos à automatização do processo.

Tabela 16: Caderno de encargos

Designação	Fornecedor	Preço unidade €	nº de unidades	Preço total €
Parafuso M4×30	DME	0,28	6	1,68
Parafuso M4×40	DME	0,31	4	1,24
Parafuso M5×35	DME	0,22	4	0,88
Parafuso M6×22	DME	0,35	6	2,1
Parafuso M5×25	DME	0,22	4	0,88
Parafuso M5×16	DME	0,21	6	1,26
Parafuso M8×30	DME	0,27	4	1,08
Parafuso M8×70	DME	0,55	6	3,3
Extractor 3x100	Sutafer	1,37	2	2,74
Extractor 6x100	Sutafer	1,61	1	1,61
Anel de localização	DME	38,81	1	38,81
Bico de injeção	DME	36	1	36
Pino guia	DME	7,81	4	31,24
Casquilho	DME	4,14	4	16,56
Cartucho de aquecimento	Resitec	26,35	4	95,20
Aço Orvar Supreme	F.Ramada	9,30	32 kg	297,6
Aço Himpax HH	F.Ramada	3,30	29 kg	104,4
Maquinagem	Moldaveiro	-	-	2900
TOTAL				3536,6

5. Conclusões e trabalhos futuros

A Indústria Portuguesa de Moldes tem vindo a crescer e a consolidar a sua notoriedade no mercado internacional, impulsionada, quer pela procura externa, quer por uma competitiva relação qualidade/preço/prazos de entrega.

A microinjecção de termoplásticos é actualmente um dos processos mais eficientes para a produção em larga escala de polímeros termoplásticos. O processo de microinjecção não é apenas uma redução do processo de injecção convencional, todo o processo tem de ser repensado. [6]

Com o objectivo de tornar possível a utilização de máquinas de macro-injecção para a produção de micro-componentes, esta tese foi pensada e elaborada. Todo o projecto da ferramenta moldante foi pensado com o objectivo de coligar a macro-injecção com a microinjecção, aproveitando assim o vasto parque de máquinas de injecção convencional para produção de micro-componentes. Assim poderá ser possível abraçar novos desafios, entrando num recente mercado que nos últimos anos tem mobilizado intensa pesquisa associada às micro-tecnologias e um consumo e procura cada vez maior de micro-componentes.

Ao longo da elaboração da tese, surgiram diversos problemas associados ao projecto dos sistemas funcionais da ferramenta moldante. Toda a estrutura do molde teve de ser adaptada para ultrapassar as dificuldades que emergiram ao longo do projecto, e assim alcançar o objectivo para o qual a ferramenta moldante foi idealizada.

A principal dificuldade localizou-se no dimensionamento do sistema variotérmico da ferramenta moldante, sistema sem o qual, o material polimérico injectado provavelmente solidificaria quando entrasse em contacto com as paredes do molde, tornando quase impossível a obtenção de micro-componentes. O sistema variotérmico é responsável pelo controlo de temperatura na ferramenta moldante. Tem a função de aquecer e arrefecer o molde quando necessário. A principal dificuldade do projecto emerge no aquecimento da ferramenta moldante, e não na refrigeração. Isto deve-se ao facto de na microinjecção, ser utilizada uma pequena quantidade de material polimérico para a produção das microestruturas, sendo que a transferência de calor realizada, por este, para a ferramenta moldante é quase insignificativa.

No que diz respeito ao aquecimento da ferramenta moldante, numa primeira fase, foi projectado um sistema de linhas de água que funcionará como um sistema de controlo de temperatura. Este sistema projectado vai aquecer a ferramenta moldante até a uma temperatura muito próxima da extracção do material polimérico a injectar. O restante aquecimento estará a cargo das quatro resistências eléctricas na forma de cartucho. A escolha deste sistema, teve em atenção a potência necessária para a ferramenta moldante projectada, o factor custo/eficiência e a geometria do molde. Pretende-se com a utilização das linhas de água no aquecimento, reduzir a energia requerida para a realização desta operação.

A determinação do tempo exacto de aquecimento só é possível recorrendo a utilização do termopar residente no molde. Outra função, será avaliar qual o momento em que a injeção do material polimérico é possível realizar. Quando a temperatura do molde for igual a temperatura de transição vítrea do material polimérico que se pretende injectar, no caso dos polímeros amorfos, ou por sua vez a temperatura de fusão no caso dos polímeros semicristalinos, então estão reunidas as condições para se iniciar a injeção. Terminada a fase de injeção e compactação, o sistema de aquecimento projectado cessará a sua função e terá início uma nova fase, a fase de refrigeração do molde, para que seja possível a extracção do micro-componente obtido.

A refrigeração da ferramenta moldante estará a cargo do sistema de controlo de temperatura, que também tem como função aquecer o molde. O sistema de controlo de temperatura projectado, onde a temperatura da água que nela circula, será muito próximo da temperatura de extracção do material polimérico, vai permitir diminuir a temperatura da ferramenta moldante, para que seja possível a extracção do produto obtido. O meio ambiente neste processo terá como função retirar calor da ferramenta moldante, visto que esta estará a uma temperatura elevada comparando com a temperatura ambiente. A troca de calor entre estes dois agentes será elevada. O termopar possuirá aqui também um papel fundamental para determinar quando é possível realizar a extracção.

Sempre que a ferramenta moldante esteja sujeita a vários ciclos de injeção consecutivos, o sistema de controlo de temperatura desempenhará um papel fundamental. Este irá possibilitar que a temperatura da ferramenta moldante não baixe demasiado. Entrando em acção o sistema de aquecimento projectado, elevando novamente a temperatura da ferramenta moldante até à temperatura desejada.

A determinação do tempo do ciclo, só é possível também recorrendo a este dispositivo. Com a ferramenta de simulação numérica utilizada neste projecto, não é possível determinar o tempo de arrefecimento necessário, visto que para a realização de uma análise variotérmica nesta ferramenta, só é possível realizar uma análise de injeção + compactação. Para a realização de uma análise de refrigeração, é necessário definir o perfil de temperaturas dos componentes testados, tendo-se, portanto optado pela análise analítica com atrás referido.

A modelação de toda a ferramenta moldante tornou-se um desafio rigoroso, uma vez que o domínio da ferramenta de desenho (Catia V5) era necessário. A realização do mesmo implicou conhecimentos em diversas áreas de Engenharia Mecânica, como por exemplo, projecto e fabrico de moldes e ferramentas, transferência de calor, concepção e desenvolvimento de produto bem como materiais. Um dos objectivos era minimizar os custos associados ao projecto. Para tal, diferentes orçamentos foram requeridos, sendo que a escolha final recaiu naqueles que apresentaram, para um mesmo componente, um valor mais reduzido.

De referir que as principais dificuldades encontradas, surgiram principalmente na obtenção de resposta aos vários pedidos de orçamento realizados às diferentes empresas contactadas.

No que diz respeito a trabalhos futuros, deixam-se aqui algumas sugestões que poderão ser levadas em linha de conta no futuro:

- O fabrico da ferramenta moldante projectada;
- Optimização de todo o processo para que os interesses académicos e de investigação desejados pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, consigam ser alcançados;
- Realizar toda a automação necessária, de forma a conseguir a automatização de todas as etapas do processo de produção de micro-componentes;

6. Referências

1. Gang Fu, S.T., Ngiaphiang Loh, Beeyen Tay and David E Hardt, *A micro powder injection molding apparatus for high aspect ratio metal micro-structure production*. JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING, 2007.
2. Wicht, H.B., J, *NEXUS Market Analysis for MEMS and Microsystems III*, 2005-2009. 2005.
3. Santos, T.M.d., *Simulação Computacional do Processo de Micro Injecção*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2008, Universidade de Aveiro.
4. Pei-Chi Changa, S.-J.H., Huei-Huang Lee, Durn-Yuan Huangc, *Development of an external-type microinjection molding module for thermoplastic polymer*. Journal of Materials Processing Technology, 2006.
5. Y. Tang , W.K.T., J.Y.H. Fuh, H.T. Loh, Y.S. Wong, S.C.H. Thian, L. Lu, *Micro-mould fabrication for a micro-gear via vacuum casting*. Journal of Materials Processing Technology, 2007.
6. Julien Giboz, T.C., Patrice Mélé, *Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review*. Journal of micromechanics and microengineering, 2007. 17(6): p. 96-109.
7. Vasco, J.O.C., *A Micro-Fabricação aplicada ao processo de Micro-Injecção*. 2006, Universidade do Minho-Escola de Engenharia
8. Donald V. Rosato, D.V.R., ed. *Injection Molding Handbook, the complete molding operation technology, performance and economics*. Second Edition ed. 1995, Chapman & Hall.
9. Donald V. Rosato, D.V.R., *Injection Molding Handbook, the complete molding operation technology, performance and economics*, ed. C.H. Second Edition ed. 1995. 1995.
10. <http://www.machinerylubrication.com/Backup/200305/IndFoc-Fig1.jpg> (máquina de injeção convencional), Consultado em Março, 2009.
11. Gornik, C., *Injection Moulding of Parts with Microstructured Surfaces for Medical Applications*. 2004.

12. Vasco, J.O.C., *A Micro-Fabricação aplicada ao processo de Micro-Injecção*, in *Escola de Engenharia*. 2006, Universidade do Minho: Braga.
13. Pei-Chi Changa, S.-J.H., Huei-Huang Lee, Durn-Yuan Huangc, *Development of an external-type microinjection molding module for thermoplastic polymer* Journal of Materials Processing Technology, 2006. 184(1-3): p. 163-172.
14. A.-C. Liou , R.-H.C., *Injection molding of polymer micro- and sub-micron structures with high-aspect ratios*. Int J Adv Manuf Technol, 2006.
15. Lei Xie, G.Z., *A visual mold with variotherm system for weld line study in micro injection molding*. Microsyst Technol, 2008.
16. G. Fu, N.H.L., S. B. Tor B. Y. Tay, Y. Murakoshi, R. Maeda, *A variotherm mold for micro metal injection molding*. Microsyst Technol, 2005.
17. M Hecke, W.S., *Review on micro molding of thermoplastic polymers*. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2004. 14(3): p. 1-14.
18. Barros, I.M.F.d.C.S.d., *Modelação do Comportamento Térmico de Moldes de Injecção* 1997, Universidade do Minho.
19. *Manual do Projectista*. 2003.
20. Georg Menges, P.M., *How to Make Injection Molds*. Second Edition ed. 1992: Hanser.
21. Witt, F.P.I.D.P.D., *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. Quinta edição ed. 1995.
22. *Moldflow Plastics Insight 6.0®*.
23. Silva,L.A.R, *Modelação do Transporte de Fluidos Newtonianos e Newtonianos Generalizados*, in *Faculdade de Engenharia 2001*, Universidade do Porto.

7. Anexos

7.1. Placa de aperto da injeção;

7.2. Cavidade;

7.3. Bucha;

7.4. Calços;

7.5. Placa Extractora 1;

7.6. Placa Extractora 2;

7.7. Pino Guia;

7.8. Placa de aperto da bucha;

7.9. Anel de Localização;

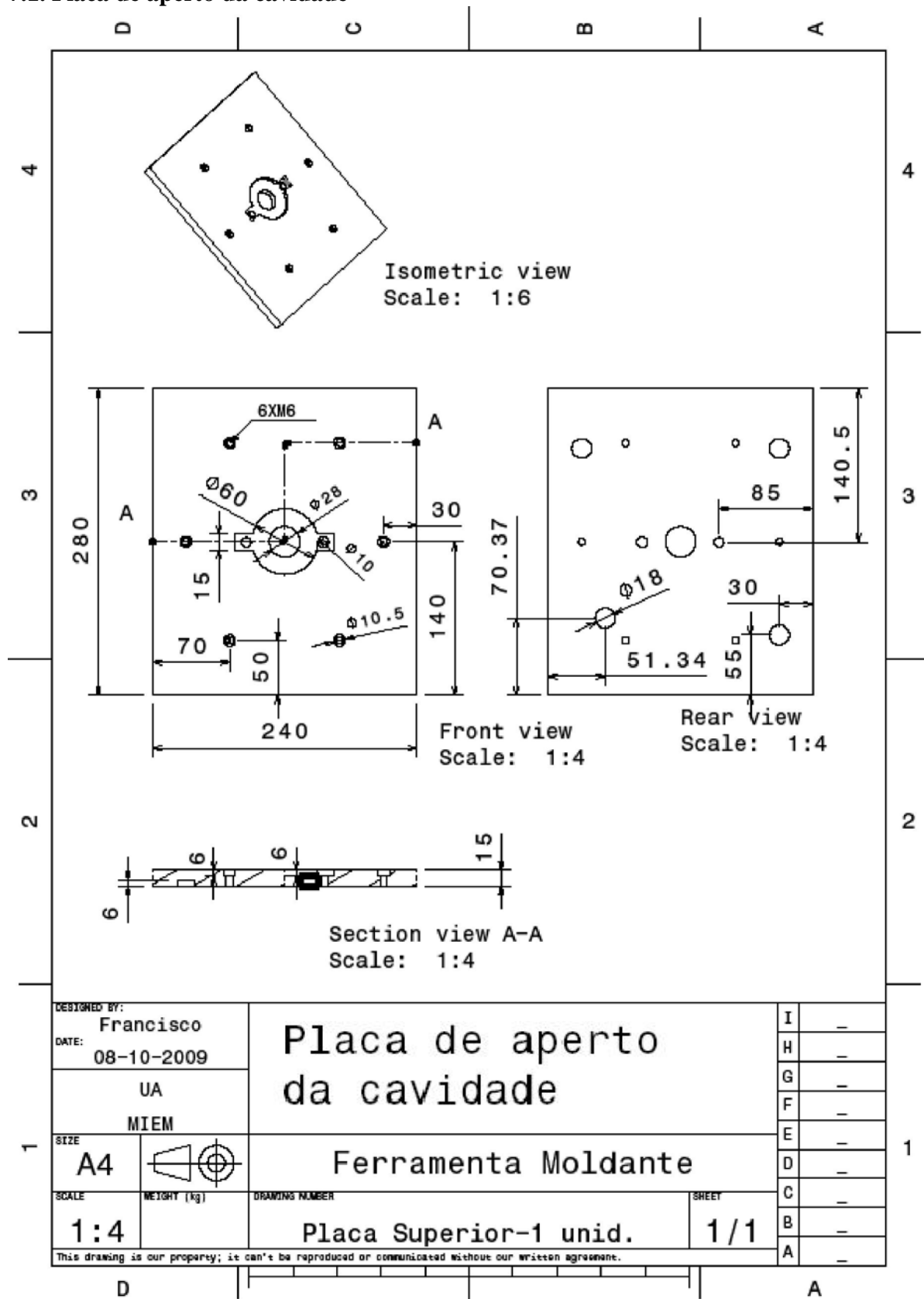
7.10. Bico de Injeção;

7.11. Pino Guia Cavidade;

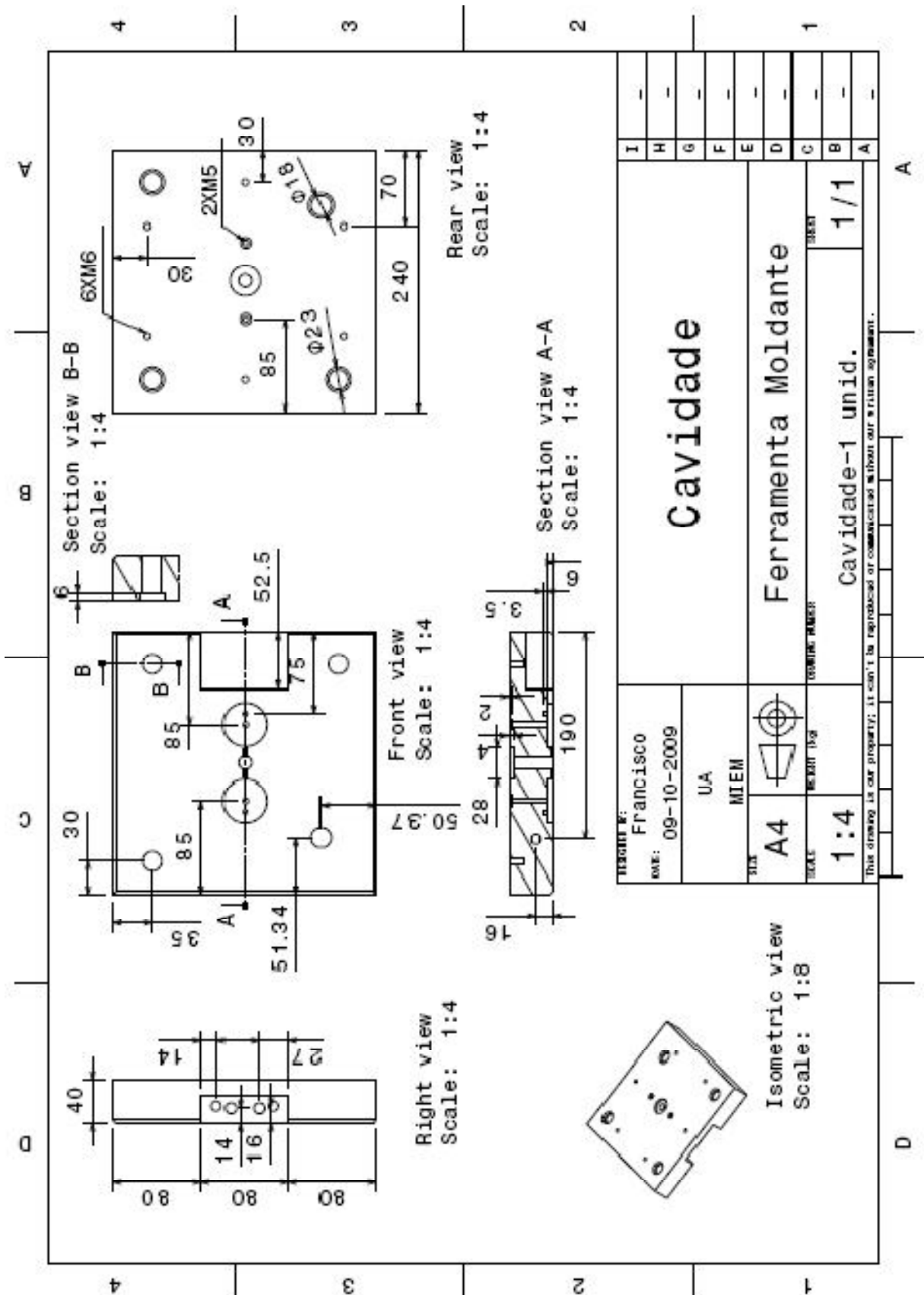
7.12. Inserto;

7.13. Molde.

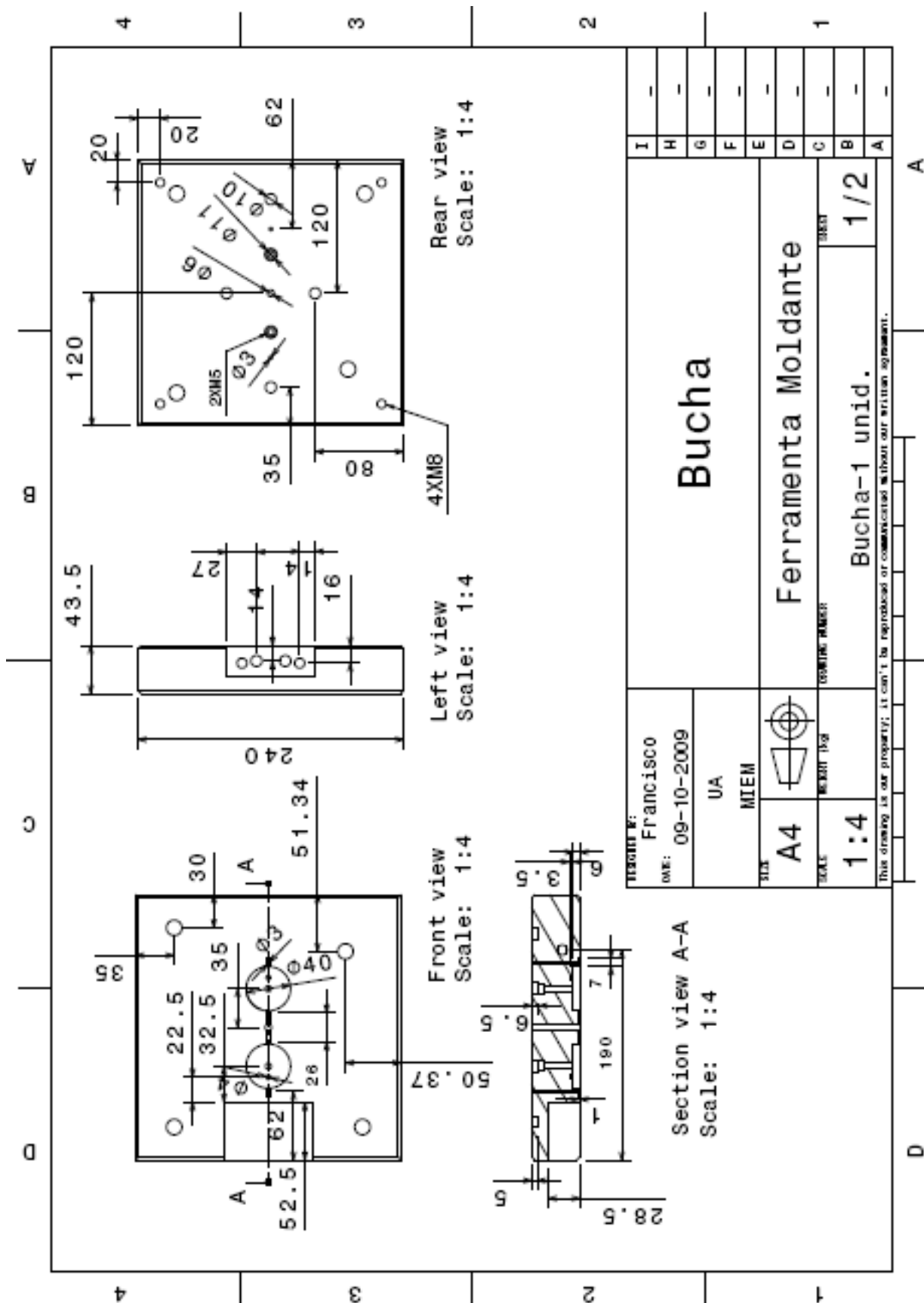
7.1. Placa de aperto da cavidade



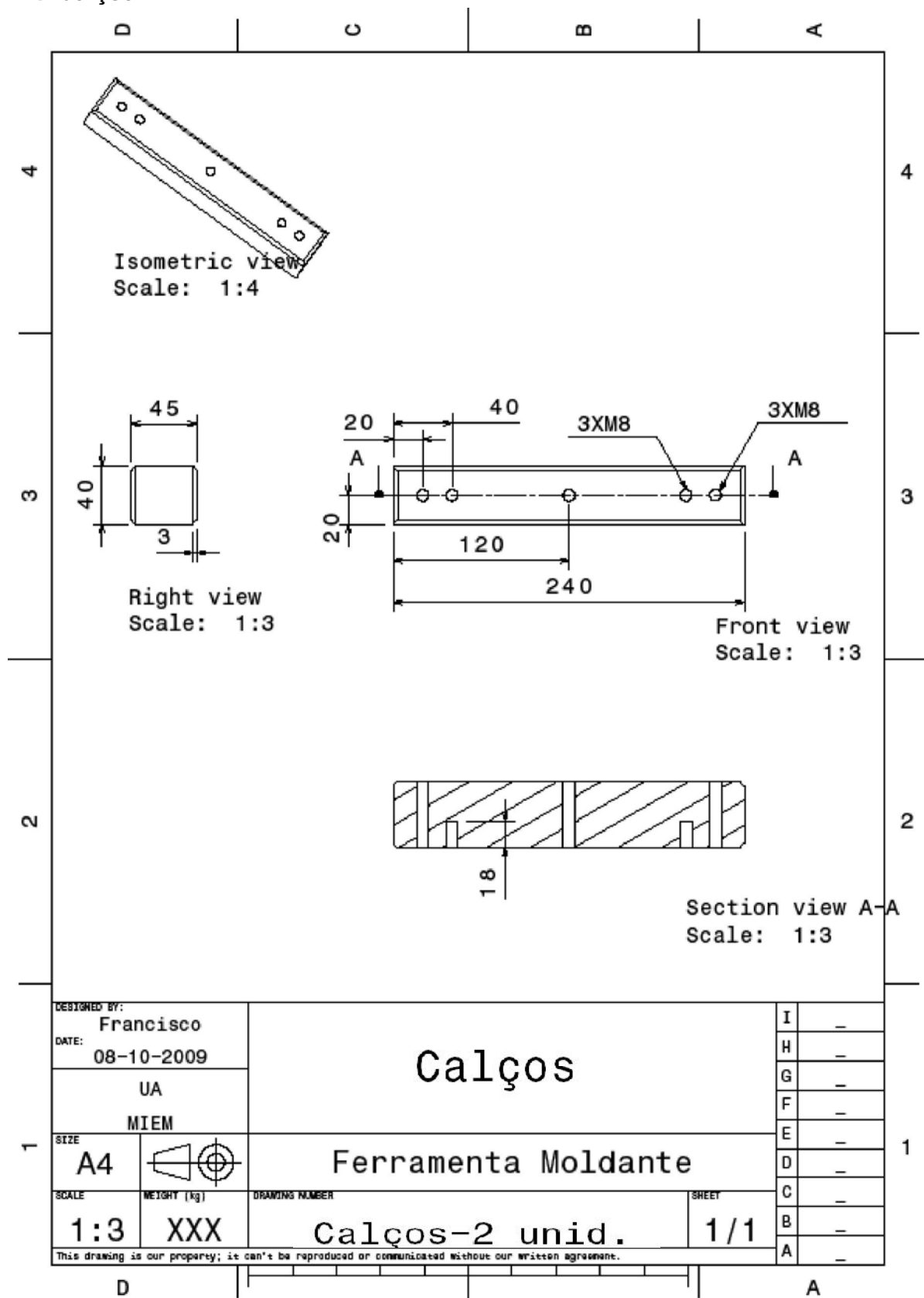
7.2. Cavidade



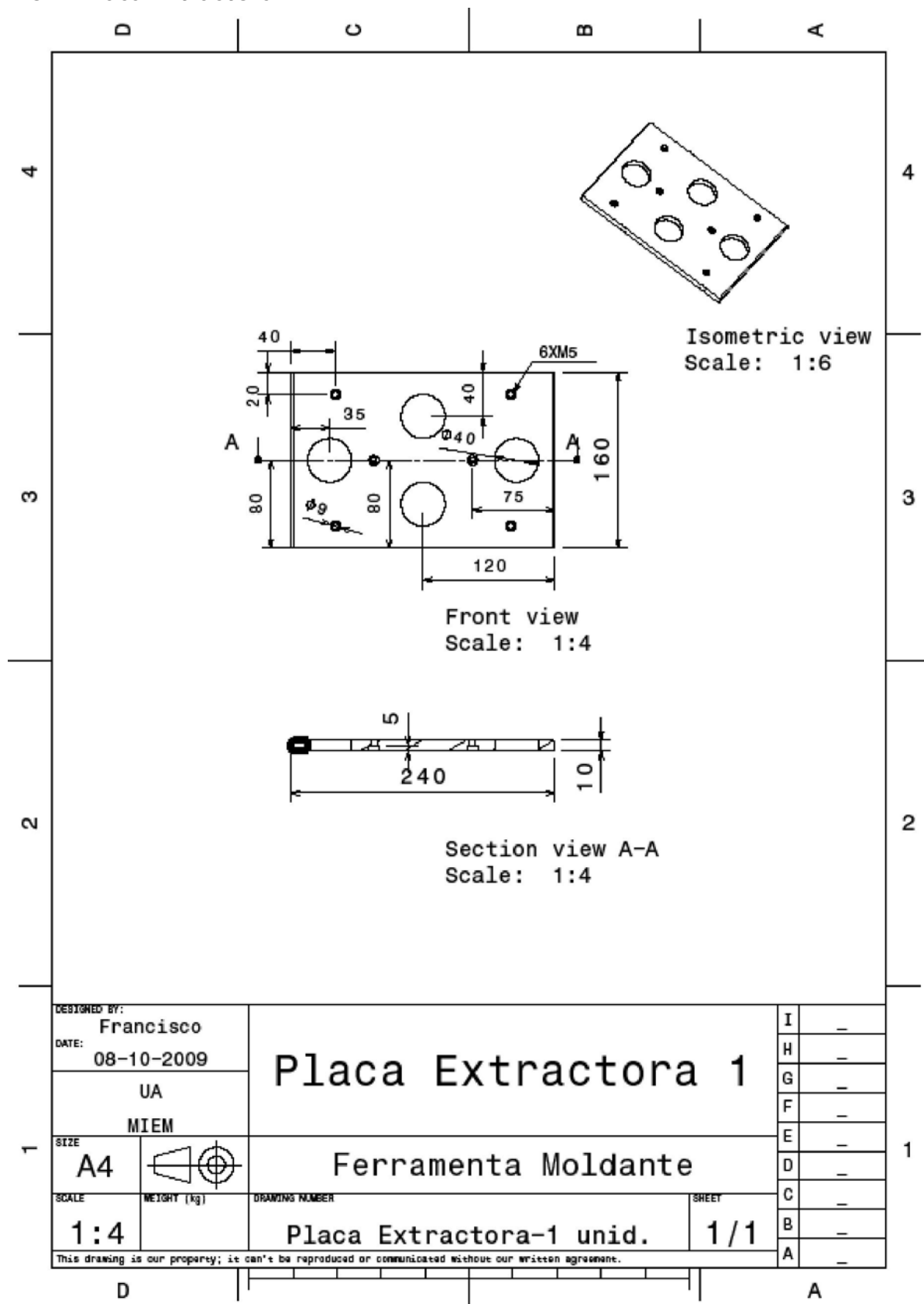
7.3. Bucha



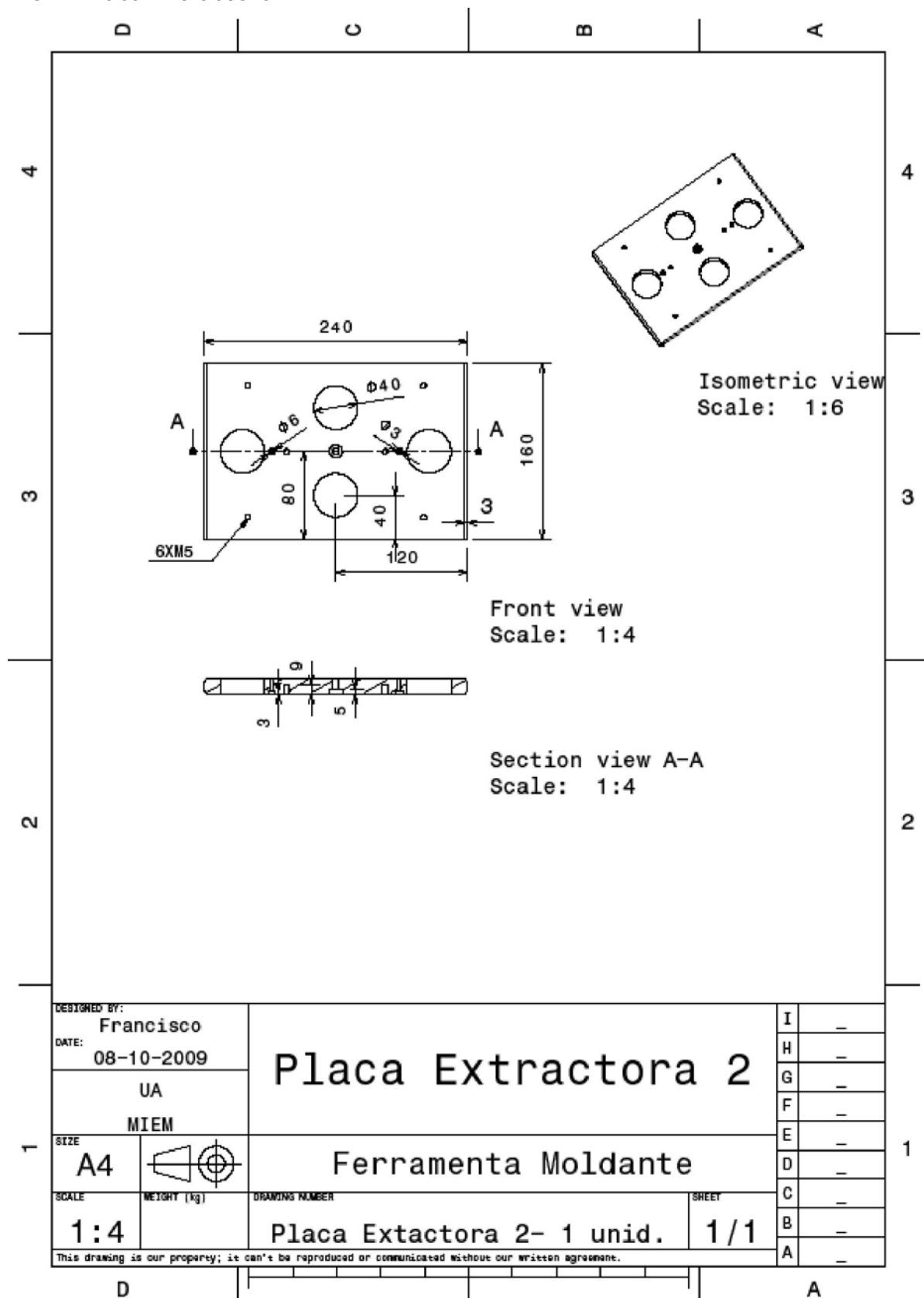
7.4. Calços



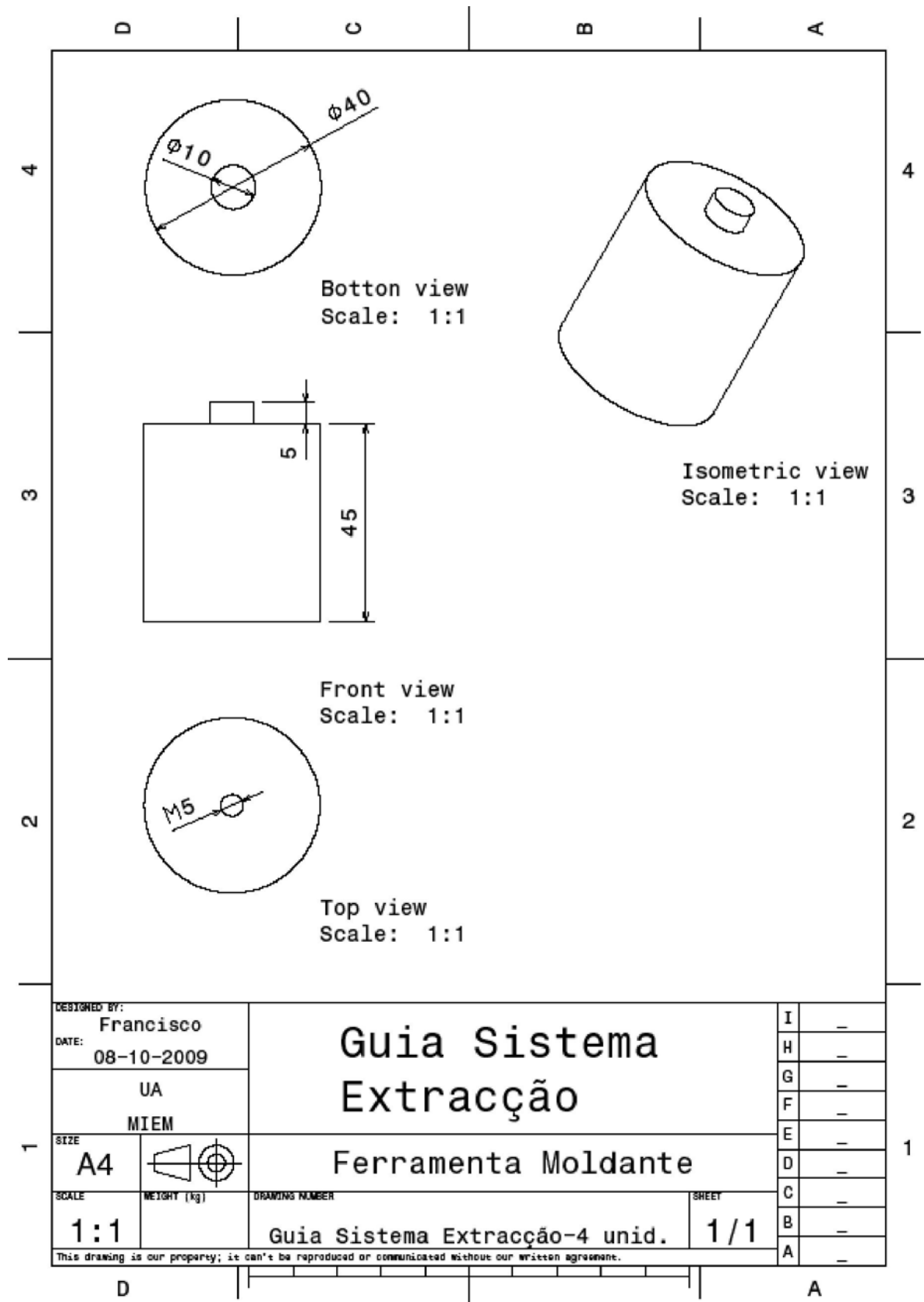
7.5. Placa Extractora 1



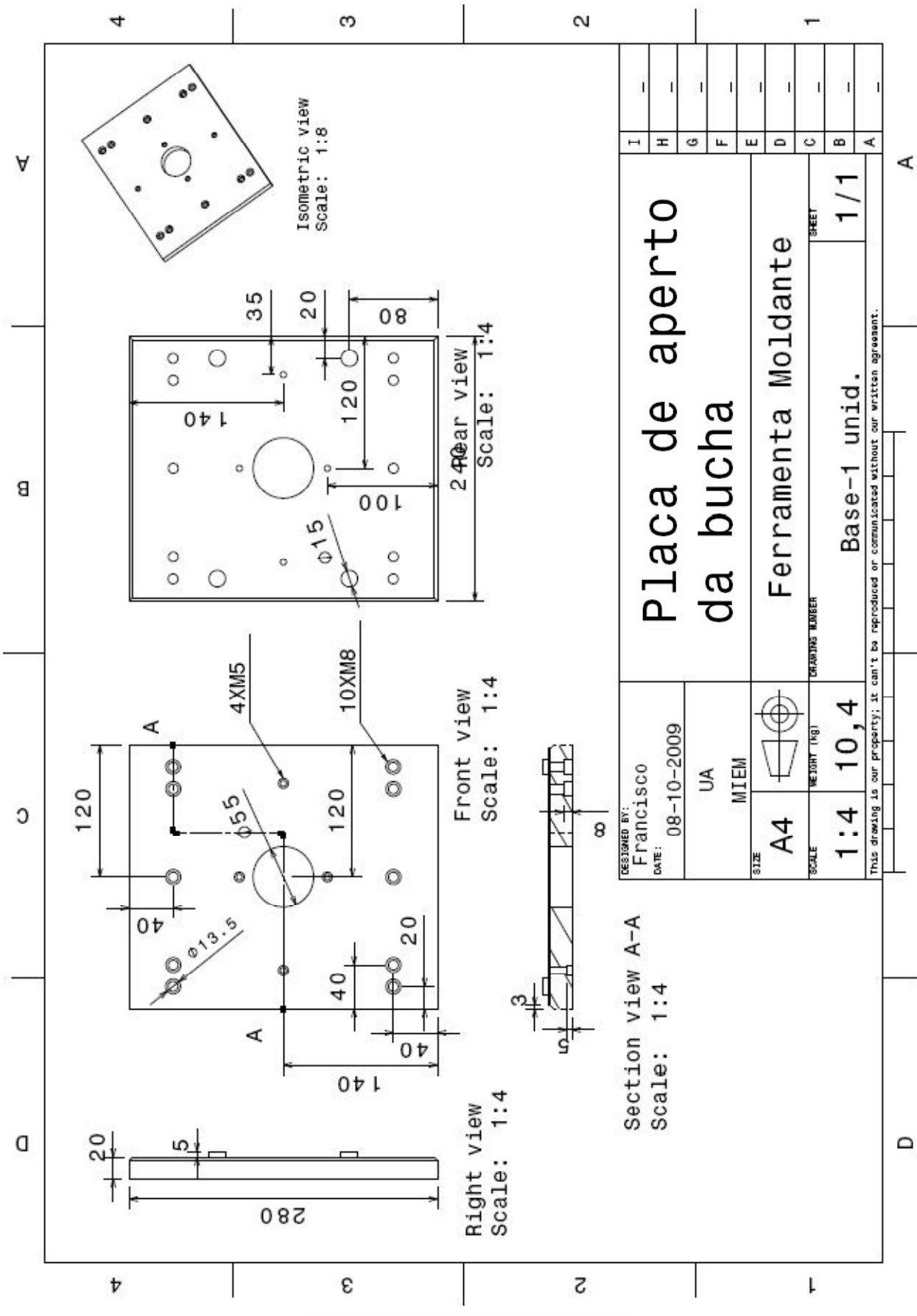
7.6. Placa Extractora 2



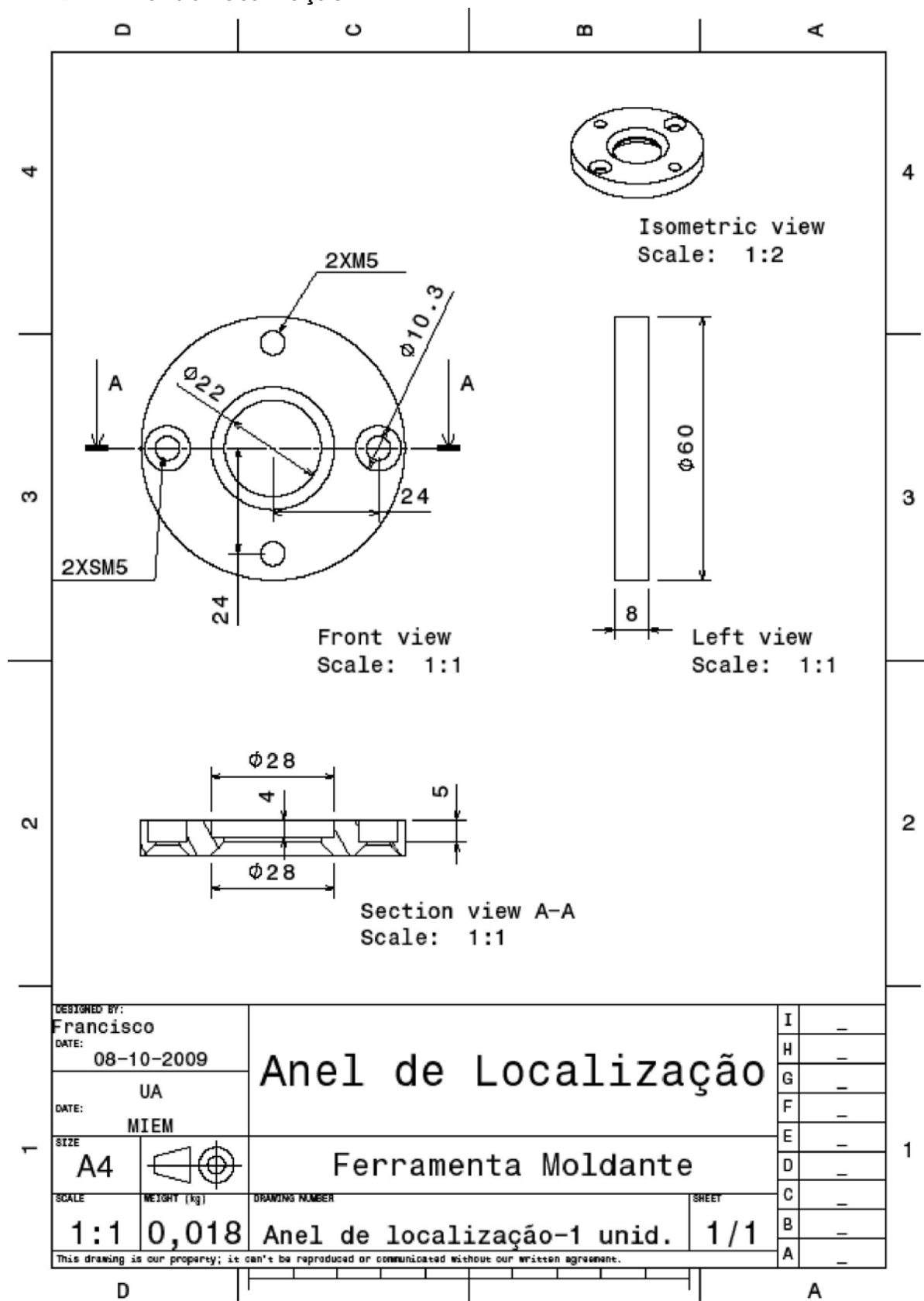
7.7. Pino Guia



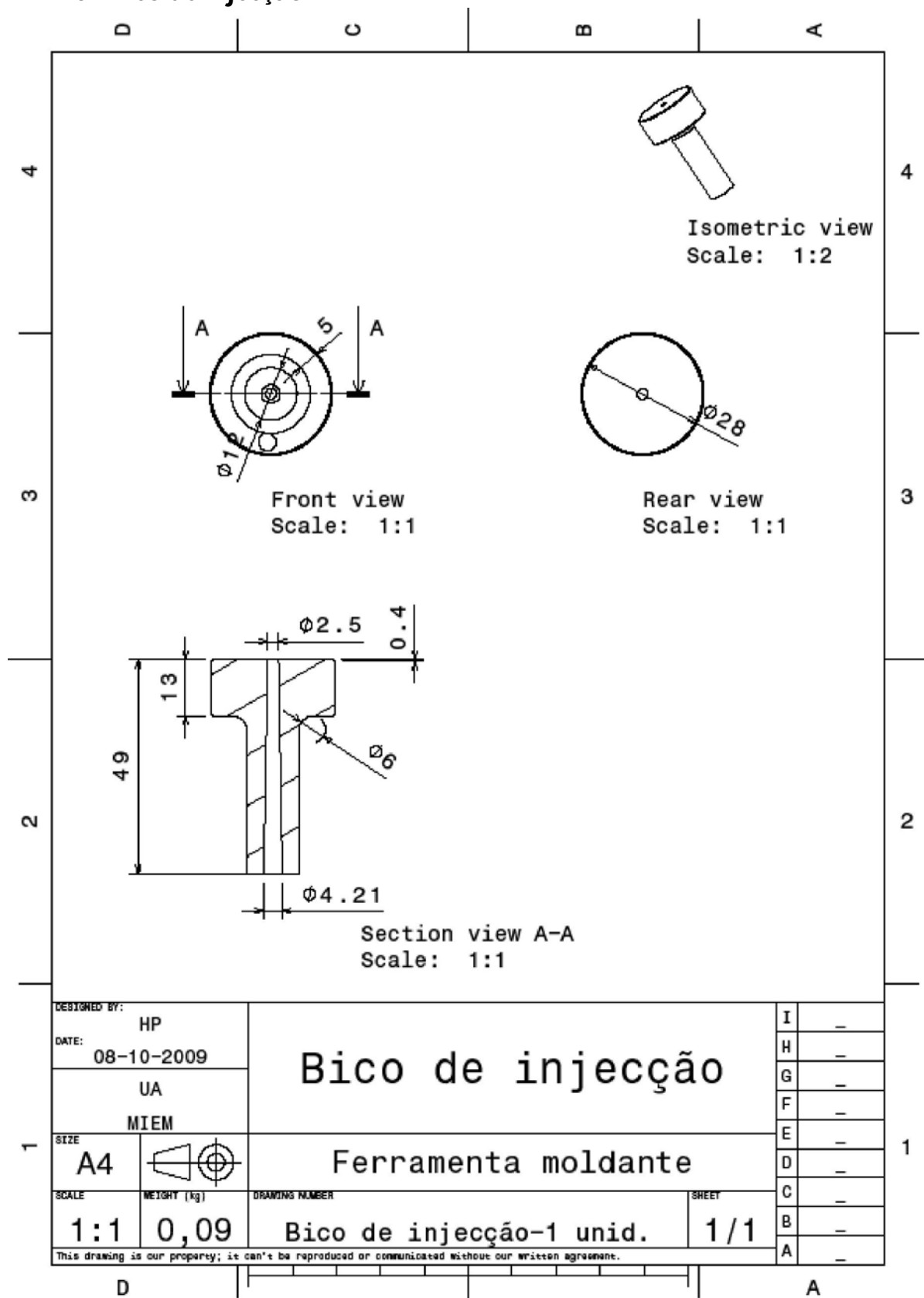
7.8. Placa de aperto da bucha



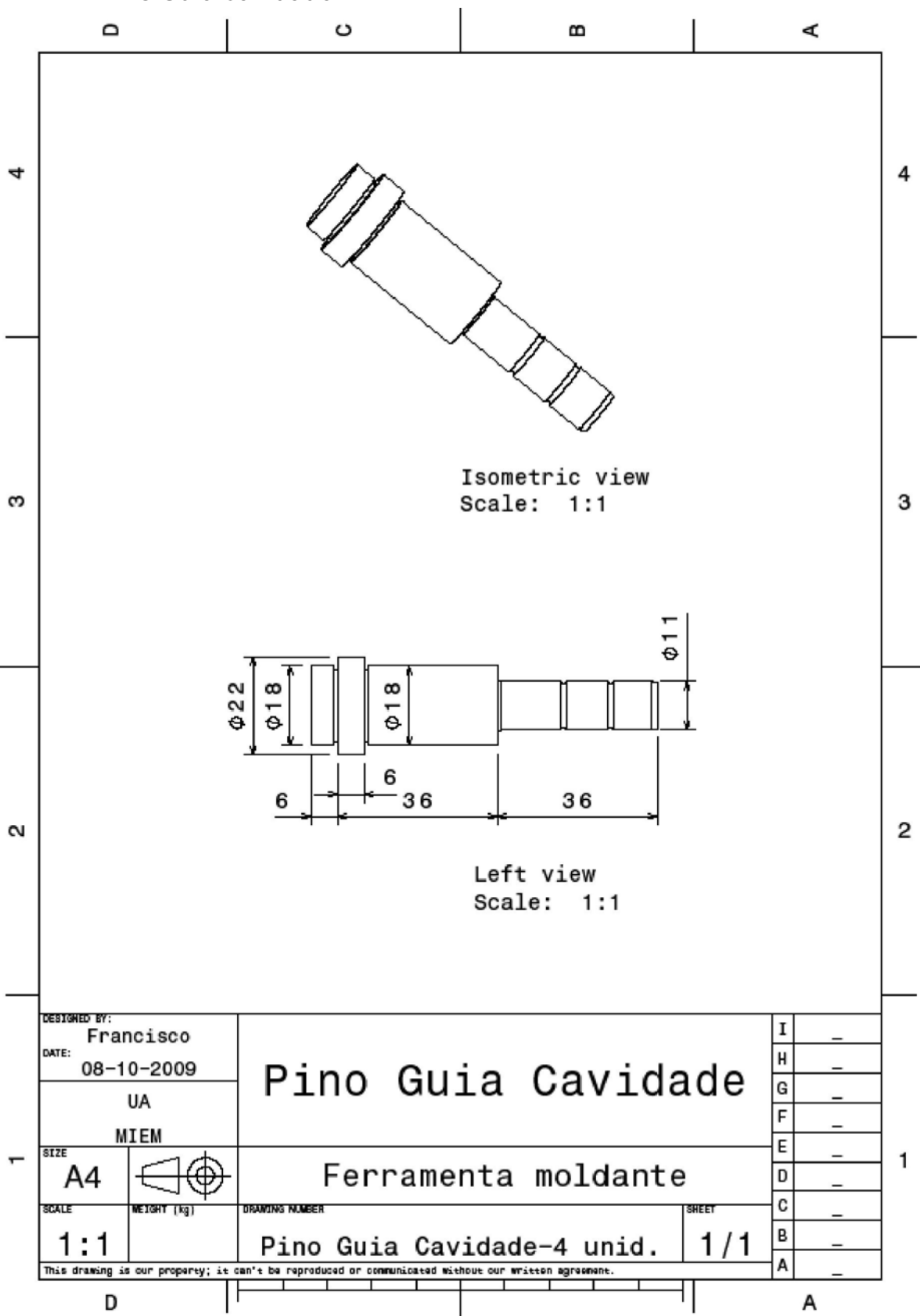
7.9. Anel de Localização



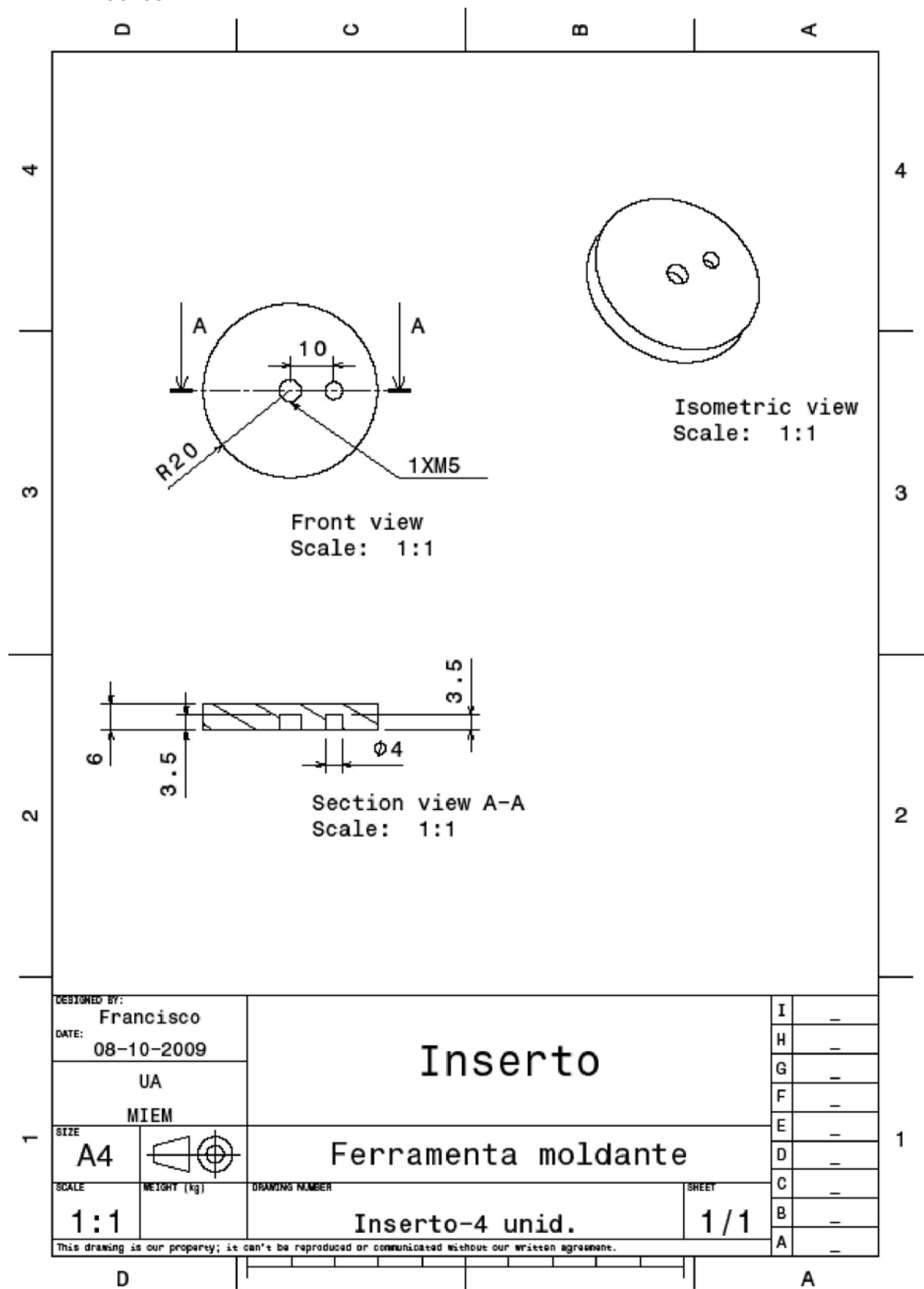
7.10. Bico de injeção



7.11. Pino Guia Cavidade



7.12. Inserto



7.13. Molde

